IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

الوكالة الدولية للطاقة الذرية

الآفاق العالمية في ميدان الاندماج لعام 2024

العدد الثاني

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
الآفاق العالمية في
ميدان الاندماج
لعام 2024

"المسار المؤدي إلى طاقة الاندماج هو دليل على براعة الإنسان ومثابرته".

المدير العام للوكالة،
السيد رافائيل ماريانو غروسي

لا يمكن إنكار الزخم الذي تشهده طاقة الاندماج اليوم. واستلهاماً من هذا التقدم، أطلقتُ في العام الماضي منشور الوكالة المعنون "الآفاق العالمية في ميدان الاندماج" الذي يشكِّل مرجعاً عالمياً شاملاً يتتبَّع أحدث التطورات في مجال طاقة الاندماج. وأنا سعيد جداً بالقبول الذي لاقاه هذا المنشور.

والمسار المؤدي إلى طاقة الاندماج هو دليل على براعة الإنسان ومثابرته. وحرصاً على توفير المزيد من الدعم لهذا المسار، أنشأتُ الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج في مبادرة عالمية مكرسة لتعزيز التعاون بين جميع الجهات المعنية. ومهمتنا طموحة وواضحة على حد سواء، وهي تسريع وتيرة البحوث والأنشطة المضطلع بها لتطوير طاقة الاندماج وإيضاحها ونشرها. وعن طريق الجمع بين ممثلي قطاع الصناعة والحكومات والأوساط الأكاديمية والهيئات الرقابية، نرسي الأسس اللازمة لبناء مجتمع متماسك معني بطاقة الاندماج يعمل أفراده يداً بيد في سبيل تحقيق الأهداف المشتركة.

وتؤدي الحكومات دوراً حاسماً في هذا المسعى. وتُعَدُّ الاستثمارات الاستراتيجية للقطاع العام والسياسات الداعِمة القوية والتعاون الدولي عوامل أساسية في نقل طاقة الاندماج من المختبر إلى شبكة الكهرباء. وهذه الجهود المتواصلة هي ركيزة نجاح المجتمع العالمي المعني بالاندماج في تحقيق أهدافه. وأشجعُ على وضع أطر رقابية تتناسب مع المخاطر وتوفِّر القدر اللازم من الوضوح لتسريع عملية تطوير طاقة الاندماج واجتذاب الاستثمارات في هذا القطاع.

وفي هذا العام، دعوتُ أيضاً فريقاً من الخبراء الدوليين لتحديد مجموعة من العناصر الأساسية للاندماج بغية توفير خارطة طريق شاملة وإرشادات قيِّمة في الأجلين القصير والمتوسط للعلماء والمهندسين والرقابيين ورواد الأعمال وواضعي السياسات والجهات المعنية في شتى أنحاء العالم.

ومع دخولنا مرحلة حاسمة في ميدان طاقة الاندماج، يجب علينا تكثيف جهودنا في جميع القطاعات لتطوير التكنولوجيات التمكينية والمواد المناسبة، وتعزيز الشراكات بين القطاعين العام والخاص، والاستفادة من رؤوس الأموال الخاصة لضمان الجدوى التجارية، وبناء قوى عاملة عالمية. وتتطلب طاقة الاندماج توافر مجموعة واسعة من الأفراد ذوي الخبرات، بمن فيهم العمال المهرة والمهنيون المختصون بالقانون والسياسات العامة والاتصالات، الذين يسهمون جميعاً في الاقتصاد العالمي.

ويعِد الاستثمار في بحوث طاقة الاندماج واستغلالها التجاري بفوائد اقتصادية كبيرة تتجاوز إلى حد بعيد إمكانية إزالة ثاني أكسيد الكربون. وللتكنولوجيات الناشئة عن تطوير طاقة الاندماج تطبيقات في مجالات الرعاية الصحية، والدفع الفضائي، والتصوير الصناعي، وحفر الآبار لاستخراج الطاقة الحرارية الأرضية، والتصرف في النفايات النووية، من بين جملة تطبيقات أخرى، وهو ما يفتح آفاقاً تجارية جديدة تتعدى قطاع توليد الطاقة.

وفي حين نسعى إلى التغلب على تعقيدات هذه التكنولوجيا الرائدة، يبقى عزمنا على تسخير قوة طاقة الاندماج من أجل عالم قوامه الاستدامة والازدهار والسلام عزماً راسخاً. ولم يعد بلوغ حقبة الاندماج مجرد طموح، بل بات هدفاً ملموساً في متناول أيدينا، ومعاً سنحققه بالتأكيد.

ولا يقتصر هدف عدد هذا العام من منشور "الآفاق العالمية في ميدان الاندماج" على تتبُّع التطورات والإنجازات الرئيسية. فهو يسلط الضوء أيضاً على المفاهيم الناشئة الخاصة بالمحطات، والجداول الزمنية المتوقعة لتطوير طاقة الاندماج، وأطر السياسات العامة، والاتجاهات في استثمارات القطاعين العام والخاص على حد سواء. وفضلاً عن ذلك، يغطي هذا العدد ما أسفرت عنه البحوث من مقاييس وأرقام ويتضمن عرضاً للآفاق الإقليمية والقطاعية. وأنا على ثقة بأن منشور "الآفاق العالمية في ميدان الاندماج" سيبقى مرجعاً قيِّماً تسترشد به الجهات المعنية في قطاعات الطاقة والسياسات العامة والبحوث في سعيها إلى النهوض بطاقة الاندماج.■

المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي،
أثناء إلقاء كلمته في بلجيكا، في آذار/مارس 2024.

"يُعَدُّ تطوير طاقة الاندماج نقطة تحوُّل محتملة في الأجل الطويل وأداة رئيسية لبناء مستقبل مستدام يسوده السلام والأمن".

أنطونيو تاياني،
نائب رئيسة مجلس الوزراء، ووزير الشؤون الخارجية والتعاون الدولي

أنطونيو تاياني، نائب رئيسة مجلس الوزراء، ووزير الشؤون الخارجية والتعاون الدولي في إيطاليا (الصورة مهداة من الحكومة الإيطالية).

طاقة الاندماج: تحدٍ غير مسبوق وفرصة للمستقبل

يشرِّفنا أن نشارك في تنظيم الاجتماع الوزاري الافتتاحي للفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج وفي استضافته. وتبرِز هذه الفعالية دعم الحكومة الإيطالية للتعاون الدولي، والتزامنا الطويل الأمد بالتقدم التكنولوجي الذي يمثِّل قوة دافعة رئيسية للنمو والرفاه والازدهار.

وأمن الطاقة هو أولوية في السيناريو الراهن الذي ينطوي على اضطرابات جيوسياسية متزايدة. ومن المنظور السياسي، توفِّر طاقة الاندماج إمكانات هائلة لمواجهة هذه التحديات وضمان الاكتفاء الذاتي من الطاقة، وتحدٌّ في الوقت ذاته من التوترات الجيوسياسية المرتبطة باستغلال الوقود الأحفوري. وأشيرُ أيضاً في هذا الصدد إلى أن طاقة الاندماج تتيح تحسين فرص الانتفاع بالكهرباء في مناطق واسعة من العالم حيث لا يزال ثمة نقص في البنى الأساسية الفعالة لتوليد الكهرباء.

وقد يكون تطوير تكنولوجيات جديدة في القطاع النووي خطوة رئيسية على مسار الانتقال إلى الطاقة النظيفة ومكافحة تغير المناخ. وسبق أن أُدرجَت الطاقة النووية في تصنيف الاتحاد الأوروبي باعتبارها طاقة نظيفة، وأعتقدُ أنه لا يمكننا أن نفوِّت الفرصة التي تقدِّمها بداية ولاية البرلمان الأوروبي الجديد. وبغية الحد من اعتمادنا على الوقود الأحفوري، يجب أن ننظر في اعتماد مزيج متنوع من مصادر الطاقة يشتمل في آن واحد على قوى الاندماج ومصادر الطاقة المتجددة والهيدروجين والتكنولوجيات النووية الناشئة مثل المفاعلات النمطية الصغيرة. وسيكون لذلك أيضاً تأثير إيجابي في تكاليف الطاقة، وسيفضي إلى زيادة القدرة التنافسية لشركاتنا وإلى تعزيز النمو.

وبعبارة أخرى، يُعَدُّ تطوير طاقة الاندماج نقطة تحوُّل محتملة في الأجل الطويل وأداة رئيسية لبناء مستقبل مستدام يسوده السلام والأمن.

ونتيجةً للأنشطة المضطلع بها في سبيل دفع عجلة الابتكار وزيادة الاستثمارات، أوشكت طاقة الاندماج أن تصبح حقيقة واقعة. وتودُّ إيطاليا أن تظل في مقدمة القائمين بهذه الجهود بفضل الدراية المتوافرة لدى العديد من مؤسساتها العامة والخاصة المعنية.

وللجهود المبذولة على الصعيد التكنولوجي والعلمي والمالي أهمية جوهرية. ومن الضروري للغاية تعزيز التعاون الدولي والشراكات بين القطاعين العام والخاص لجمع الاستثمارات الكبيرة التي تشتد الحاجة إليها ولإتاحة الاستخدام الشائع للبنى الأساسية المتقدمة والخبرات التي ترتكز على درجة عالية من التخصص. وهذا هو أيضاً هدف الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج الذي له دور أساسي في منع تحوُّل هذه الجهود العلمية إلى ساحة جديدة للتنافس الجيوسياسي.

وتحتل إيطاليا منذ زمن طويل مكان الصدارة في البحوث والابتكارات التكنولوجية المتعلقة بالطاقة النووية، بدءاً بتطويرها أول مفاعل نووي سمح للعالِم الفيزيائي الإيطالي إنريكو فيرمي بإرساء أسس الفيزياء النووية الحديثة.

واليوم، تمثِّل وكالتنا الوطنية للتكنولوجيات الجديدة والطاقة والتنمية الاقتصادية المستدامة مؤسسة رائدة في مجال طاقة الاندماج، والمركز البحثي التابع لها في فراسكاتي هو مثال واضح على الشراكة المثمرة بين القطاعين العام والخاص والأوساط الأكاديمية.

"نتيجةً للأنشطة المضطلع بها في سبيل دفع عجلة الابتكار وزيادة الاستثمارات، أوشكت طاقة الاندماج أن تصبح حقيقة واقعة".

وأذكرُ أيضاً في هذا السياق شركاتنا الرائدة في مجال الطاقة، التي نقلت جهودنا الابتكارية عبر الحدود الوطنية من خلال مشاركتها في العديد من المشاريع المبتكرة.

وإيطاليا على استعداد لتقاسم خبراتها وللمساهمة في تقليص الفجوة المعرفية بين البلدان الصناعية والبلدان النامية بصورة كبيرة. ويقع التعاون الأكاديمي والتعليم والتدريب المهني — وكذلك مشاركة القطاع الخاص — في صميم نهجنا الجديد إزاء شركائنا في مجال التنمية، وبخاصة في أفريقيا. ويقع هذا الموقف أيضاً في صميم الرئاسة الإيطالية لمجموعة الدول السبع وعملنا على المستوى الأوروبي.

وهذا مهم للغاية لأن الحقبة الجديدة للطاقة النووية وطاقة الاندماج تعتمد على العلماء والمهندسين الشباب الذين يعملون بأفضل ما لديهم من قدرات.

والطريق أمامنا طويل ومعقد والتحديات كبيرة. ويجب أن ندرك أن الخيارات التي نتخذها اليوم سترسم ملامح المشهد الاجتماعي والاقتصادي والجيوسياسي في المستقبل.

فلنعمل معاً لبناء مستقبل مشرق للأجيال القادمة.■

نعي جميعاً الحاجة إلى إيجاد حل دائم للتحديين العالميين المتمثلين في تغير المناخ وأمن الطاقة. ولتحقيق هذا الهدف، يجب أن نسير بخطى ثابتة نحو إزالة الكربون وأن ننظر في الالتزامات التي سبق أن حددناها في سياسات المناخ والطاقة والبيئة. ويشمل ذلك الوصول بصافي انبعاثات غازات الدفيئة إلى مستوى الصفر بحلول عام 2050 لحصر ارتفاع درجة الحرارة العالمية في حدود 1,5 درجة مئوية. وفي الوقت نفسه، ينبغي لنا تحويل نظمنا الاقتصادية والاجتماعية عن طريق التركيز على صافي الانبعاثات الصفري، والاقتصاد الدائري، والقدرة على تحمُّل تغير المناخ، مع العمل على ضمان النمو المستدام والشامل، وتعزيز اقتصاداتنا، وتسريع وتيرة الانتقال إلى الطاقة النظيفة.

ويجدر التأكيد مجدداً أن النُهج المرتكزة على العلوم لها أهميتها في وضع السياسات الرامية إلى معالجة الأزمة المناخية والبيئية العالمية. ويتطلب هذا الأمر توافر نَهج محايد تكنولوجياً يُستكشف على أساسه كل حل لتلبية الاحتياجات العالمية المتزايدة من حيث الطاقة بغية تحقيق التنمية المستدامة.

ويمكن أن تقدِّم طاقة الاندماج حلاً دائماً لمواجهة هذا التحدي. ومن شأن إنتاج طاقة الاندماج بنجاح أن يعود بفوائد اجتماعية وبيئية واقتصادية كبيرة باعتباره مصدراً يُحتمل أن يوفِّر طاقة نظيفة عديمة الانبعاثات ومأمونة وآمنة وغير محدودة عملياً. وأفضى احتمال استغلال محطات الاندماج المستقبلية استغلالاً تجارياً إلى اتخاذ قرار بتطوير مرافق إيضاحية على مدى العقد المقبل، وذلك بدفع من برامج بحثية واسعة النطاق يمولها الاتحاد الأوروبي وعدد من الحكومات والشركات في جميع أنحاء العالم. وسيتيح التعاون الدولي تسريع وتيرة تطوير تكنولوجيا الاندماج وإيضاحها، مما يعزز الحاجة إلى مشاركة عالمية للتغلب على التحديات البحثية وبناء سلاسل الإمداد والقوى العاملة اللازمة على المستوى الدولي.

وتتسارع التطورات في قطاع طاقة الاندماج العالمي بطريقة ملحوظة مع تزايد عدد الشركات الخاصة المساهِمة في أنشطة تطوير الاندماج المغناطيسي والاندماج بالقصور الذاتي أو نُهج مختلطة، وهي أنشطة تجتذب استثمارات كبيرة من الكيانات الخاصة والحكومات. وتخطط بعض الشركات لتشييد محطات اندماج قادرة على إنتاج الكهرباء بين عامَي 2040 و2050، أي قبل فترة منتصف القرن التي تم تصوُّرها في البرامج البحثية العامة. وفي السنوات القادمة، سيوفِّر مشروع مفاعل إيتير معلومات قيِّمة عن الإدخال في الخدمة، وسيناريوهات البلازما، والتصرف في التريتيوم والجوانب النووية، وأمان المحطات ولياقتها التشغيلية، والمناولة عن بُعد، وتفريغ القوى من

جيلبرتو بيكيتو فراتين، وزير البيئة وأمن الطاقة في إيطاليا
(الصورة مهداة من الحكومة الإيطالية).

"نعي جميعاً الحاجة إلى إيجاد حل دائم للتحديين العالميين المتمثلين في تغير المناخ وأمن الطاقة".

جيلبرتو بيكيتو فراتين
وزير البيئة وأمن الطاقة

البلازما، والتصرف في النفايات المشعة. وسبق أن وفَّر مشروع مفاعل إيتير معلومات مفيدة عن العديد من تكنولوجيات بناء مكونات المحطات ونظمها الفرعية لإنتاج الكهرباء من الاندماج. وفي إطار مشروع مفاعل إيتير، أُعلِنت مؤخراً خطط لتوسيع نهج الشراكة بين القطاعين العام والخاص التي يرتكز عليها المشروع من خلال إشراك شركات خاصة في مبادرات الاندماج، مع مساهمة شركات تعمل على تطوير محطات الاندماج، ومستخدمين نهائيين، وشركات مختصة بسلاسل الإمداد، وجامعات، ومراكز بحثية. وإلى جانب تطوير أجهزة جديدة، يُشدَّد في مشروع مفاعل إيتير على ضرورة مشاركة شركات سلاسل الإمداد منذ بداية عملية التصميم من أجل الاستفادة من الخبرات والمهارات إلى أقصى حد.

وخلال مؤتمر قمة مجموعة الدول السبع تحت الرئاسة الإيطالية، ذكَّر قادة الدول الأعضاء السبع بالتزام ورد في بيان اجتماع الوزراء المسؤولين عن المناخ والطاقة والبيئة في مجموعة الدول السبع (بيان تورينو)، وأدرجوا طاقة الاندماج ضمن مجالات التعاون من أجل مواجهة التحديات العالمية، والتزموا بإنشاء الفريق العامل المعني بطاقة الاندماج التابع لمجموعة الدول السبع. ويدل هذا الأمر أيضاً على الاعتراف المتزايد بالدور المهم لطاقة الاندماج في تحقيق الأهداف الطويلة الأجل المتعلقة بأمن الطاقة والمناخ.

وفي 21 أيلول/سبتمبر 2023، أنشأتُ المنصة الوطنية للطاقة النووية المستدامة، وأسندتُ إلى المنظمات العلمية والشركات الرئيسية العاملة في المجال النووي مهمة وضع خارطة طريق محتملة للنظر مجدداً في عملية توليد القوى النووية باعتبارها مصدراً يوفِّر طاقة عديمة انبعاثات الكربون وقابلة للتوزيع كجزء من مزيج الطاقة في إيطاليا. وأُجريَ في إطار المنصة تقييم لفائدة وجدوى إنتاج الطاقة النووية في إيطاليا اعتباراً من عام 2035، لدعم النشر الكامل لمصادر الطاقة المتجددة، وركزت المنصة في موازاة ذلك على أنشطة البحث والتطوير المتعلقة بطاقة الاندماج وعلى نشر هذا النوع من أنواع الطاقة في الأجلين المتوسط والطويل.

وبناءً على ذلك، واستناداً إلى البيانات النووية والتحليلات الصادرة عن المنصة الوطنية للطاقة النووية المستدامة، أُدرجَ في الخطة الوطنية الإيطالية للطاقة والمناخ بند للنظر مجدداً في توليد الطاقة النووية باعتبارها جزءاً من مزيج الطاقة في إيطاليا، وبند للأخذ بتكنولوجيات الانشطار المستدامة، مثل المفاعلات النمطية الصغيرة، والمفاعلات النمطية المتقدمة، والمفاعلات المتناهية الصغر، فضلاً عن مساهمة محتملة في مجال طاقة الاندماج بدءاً من عام 2050 تقريباً.

وعلى الرغم من أن إيطاليا توقفت عن إنتاج الطاقة النووية منذ ما يقارب 40 عاماً، فإن الصناعات والمؤسسات البحثية العامة واصلت الاستثمار في التكنولوجيات النووية، بما في ذلك طاقة الاندماج، واستمرت في تطوير البحوث المتعلقة بها. ولذا، بات بإمكان إيطاليا الاستفادة من الخبرات والقدرات العلمية والتقنية المتوافرة لدى منظماتها البحثية وأوساطها الأكاديمية وشركاتها وصناعاتها القائمة بغية التشجيع على بناء صناعة متينة مختصة بالاندماج باعتبارها جزءاً من إطار وطني متماسك.

والحكومة الإيطالية ملتزمة بتطوير علوم وتكنولوجيا طاقة الاندماج. وبتوجيه من وزارة البيئة وأمن الطاقة، بدأت الوكالة الوطنية الإيطالية للتكنولوجيات الجديدة والطاقة والتنمية الاقتصادية المستدامة (ENEA) بتنسيق أنشطة 21 شريكاً وطنياً، بما في ذلك عدد من المؤسسات البحثية والجامعات والشركات الرائدة، بغية تعزيز أوجه التقدم في تكنولوجيا الاندماج. وقد حصلت شركات إيطالية على عقود تزيد قيمتها على 1,5 مليار يورو لتطوير نظم ومكونات خاصة بمفاعل إيتير، ولا سيما في سياق الاستعداد لعمليات هذا المفاعل والخطوات المقبلة المرتبطة به.

كذلك، فإن شركة البحوث المعنية بنظام الطاقة (RSE) المملوكة للدولة بدأت في الآونة الأخيرة بالعمل على تطوير مواد للاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي. وبفضل هذه الخبرات، ترسِّخ الشركة مكانتها بصفتها شريكاً دولياً مهماً في مجال تطوير طاقة الاندماج.

وتستضيف إيطاليا عدة مرافق تجريبية خاصة ببحوث الاندماج، تشمل المركزين البحثيين التابعين لوكالة ENEA والواقعين في فراسكاتي قرب روما وفي براسيموني شمال جبال الأبينيني؛ ومعهد الاتحاد المعني بتجربة المجال المعكوس (RFX Consortium) في بادوفا؛ ومعهد علوم وتكنولوجيا البلازما التابع للمجلس الوطني للبحوث (ISTP-CNR) في ميلانو. وتسهم جميع هذه المرافق إسهاماً كبيراً في التقدم العلمي المحرز في مجال طاقة الاندماج. والعمل جارٍ لبناء المرفق البحثي الجديد المعني باختبار جهاز التوكاماك القائم على محرف في مركز وكالة ENEA البحثي بفراسكاتي، وذلك في إطار اتحاد مشترك بين القطاعين العام والخاص يضم وكالة ENEA وشركة الطاقة Eni والعديد من المعاهد والجامعات الإيطالية، من أجل إيضاح كيفية عمل تكنولوجيا المحرفات في مرافق الاندماج المستقبلية.

وكانت شركة Eni واحدة من أولى شركات الطاقة التي استثمرت في تكنولوجيا الاندماج، وأصبحت مساهماً استراتيجياً في شركة Commonwealth Fusion Systems في عام 2018 بهدف تسريع وتيرة إنتاج طاقة الاندماج على النطاق الصناعي.

وبغية إيجاد حلول للتحديات المتبقية المقترنة بإثبات إمكانية إنتاج طاقة الاندماج، يجب علينا توسيع نطاق التعاون الدولي من خلال السعي إلى إقامة شراكات جديدة لتعزيز أنشطة البحث والتطوير، والتشجيع على إرساء الشراكات بين القطاعين العام والخاص، ودفع عجلة الابتكار، وتقاسم الموارد لتطوير طاقة الاندماج.

وفي مرحلة يتحوَّل فيها الاندماج من مسعى علمي إلى واقع صناعي، ونظراً إلى الجهود التي لا تزال ثمة حاجة إليها لسد الثغرات التكنولوجية، من الضروري أن نواصل دعم المناخ الإيجابي القائم على التعاون وتقاسم البنى الأساسية، الذي أحاط حتى الآن بالجهود المبذولة عالمياً في مجال الاندماج. ويلزم وضع أطر واضحة خاصة بالملكية الفكرية لعمليات محطات الاندماج ومنتجاتها لإتاحة نقل التكنولوجيا بفعالية ودعم نمو سوق الاندماج في العالم.

وأودُّ التشديد في الوقت ذاته على أهمية وضع نُهج رقابية جديدة لضمان توافر مستوى عالٍ من الأمان يتناسب مع الأخطار المحدودة جداً المقترنة بالاندماج. وينبغي أن تراعي النُهج المذكورة الطابع الابتكاري لهذه التكنولوجيا الناشئة كي يتسنى نشر محطات الاندماج وتشغيلها بأمان. والتعاون الدولي بين الحكومات والوكالة الدولية للطاقة الذرية والسلطات المعنية بالأمان أمر ضروري لتطبيق نهج رقابي منسق فيما بين البلدان الساعية إلى تطوير طاقة الاندماج، وهو يوفِّر لقطاع الاندماج المستوى اللازم من الثقة والقدرة على التنبؤ.

ويمكن أن تصبح إيطاليا في المستقبل، بحكم موقعها الجغرافي، مركزاً لطاقة الاندماج في منطقة البحر المتوسط في إطار خطة ماتّي (Piano Mattei)، وأن تثبت مكانتها كبلد رائد في مواجهة التحديات الإقليمية المرتبطة بأمن الطاقة واستدامتها، وفي تعزيز بناء القدرات. وإيطاليا على استعداد لتقاسم معارفها وخبراتها الواسعة في سبيل دعم بلدان مثل الجزائر ومصر والمغرب وتونس في النهوض بتكنولوجيا الاندماج. ومن شأن البرامج المحددة الهدف المخصصة لتنمية القوى العاملة والتعليم أن توفِّر نقطة انطلاق لتنمية المهارات التي يمكن توسيعها فيما بعد لتشمل تطبيقات الاندماج.

وتعتزُّ إيطاليا بالمجموعة التي تكاد تكون فريدة من المهارات العلمية والتكنولوجية والهندسية والصناعية التي تتميز بها والتي تتيح لها الاضطلاع بدور رائد في تطوير مرافق الاندماج وتشييدها في إيطاليا وأوروبا.

ولهذه الأسباب، تفتخر إيطاليا بالمشاركة في استضافة الاجتماع الوزاري الافتتاحي للفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج (WFEG). وسيكون هذا الفريق بمثابة حافز في هذه المرحلة المفصلية حيث تُعَدُّ الجهود الموحدة عاملاً أساسياً للتقدم سريعاً في تطوير طاقة الاندماج. ونظراً إلى الزخم الذي يكتسبه المسعى العالمي إلى تطوير طاقة الاندماج، فإن الإمكانات التي توفِّرها هذه التكنولوجيا للتوصل إلى حل يؤمِّن طاقة وفيرة ونظيفة ومستدامة في المستقبل تتضح بصورة متزايدة، وهو ما اعترفت به أيضاً مجموعة الدول السبع. وقد أثارت الإنجازات الأخيرة في مجال الاندماج اهتماماً واسعاً واجتذبت استثمارات كبيرة من جانب طائفة واسعة من الجهات المعنية.

ويمثِّل تنظيم الاجتماع الافتتاحي للفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج في إيطاليا قبل انعقاد الدورة التاسعة والعشرين لمؤتمر المناخ (COP29) لحظة محورية في السعي العالمي إلى استحداث حلول متقدمة لتوفير الطاقة. ويرمي الاجتماع إلى تعزيز أثر المناقشات المتعلقة بطاقة الاندماج إلى أقصى حد وإلى تسليط أكبر قدر من الأضواء عليها ضمن الإطار الأوسع للمفاوضات الدولية بشأن المناخ. ولن يشدِّد الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج على أهمية أوجه التقدم العلمي في مجال طاقة الاندماج فحسب، بل سيسهِّل أيضاً التعاون الدولي والاستثمارات في هذه التكنولوجيا التحويلية، وهدفه هو أداء دور حاسم في رسم ملامح مستقبل الطاقة لضمان تحقيق الأهداف المناخية العالمية وتوفير إنتاج مستدام للطاقة في الأجل الطويل.

وتتطلع إيطاليا إلى النهوض بطاقة الاندماج على النطاق العالمي، وهي ملتزمة بدعم البحوث والابتكارات في هذا القطاع وبتمويلها. وسيضم برنامج إيطاليا الحيوي الخاص بطاقة الاندماج العديد من المنظمات البحثية والأوساط الأكاديمية والصناعات الإيطالية، وسيشمل أيضاً تعاوناً دولياً مع الوكالة.

وترحِّب إيطاليا بعمل الوكالة ودولها الأعضاء في مجال طاقة الاندماج وستواصل تعزيزه بهمَّة

شكر وتقدير

تولّى سيد أشرف تنسيق منشور الوكالة المعنون "الآفاق العالمية في ميدان الاندماج لعام 2024". وقاد ماتيو باربارينو عملية إعداد هذا المنشور.

المساهمون في صياغة المنشور واستعراضه

أنيكييف، أ. الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روساتوم"، الاتحاد الروسي

أرتيسيوك، ف. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

أشتشيتش، م. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

أشرف، س. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

باربارينو، م. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

بارتون، ج. شركة Helion Energy، الولايات المتحدة الأمريكية

بلومور، ك. شركة Stellarex، الولايات المتحدة الأمريكية

كاتينا، ج. شركة Gauss Fusion، ألمانيا

تشي كيم، و. المعهد الكوري لطاقة الاندماج، جمهورية كوريا

تشونغ، س. هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة، المملكة المتحدة

دونافان، ج. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

فيديريتشي، ج. اتحاد مختبرات الاندماج الأوروبية، ألمانيا

فينيرتي، م. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

غانزارسكي، ن شركة nT-Tao، إسرائيل

غودمان، أ. شركة TAE Technologies، الولايات المتحدة الأمريكية

جاسبر، إ. شركة Zap Energy، الولايات المتحدة الأمريكية

جونسون، د. شركة General Fusion، كندا

كانيكو، ت. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

ما، ت. مختبر لورانس ليفرمور الوطني، الولايات المتحدة الأمريكية

بالوسكا، ج. شركة Commonwealth Fusion Systems، الولايات المتحدة الأمريكية

شيورتينو، ف. شركة Proxima Fusion، ألمانيا

سولومون، و. شركة General Atomics، الولايات المتحدة الأمريكية

سترومستيدت، ل. مجموعة Novatron Fusion Group، السويد

سوبيا، إ. شركة Commonwealth Fusion Systems، الولايات المتحدة الأمريكية

سوريل، ج. شركة Longview Fusion Energy Systems، الولايات المتحدة الأمريكية

فاغنير، ر. الوكالة الدولية للطاقة الذرية

وايت، س. شركة Tokamak Energy، المملكة المتحدة

فورتسيل، س. قاعدة بيانات Fusion Energy Base، الولايات المتحدة الأمريكية

يوشيمورا، ن. شركة Helical Fusion، اليابان

يوشيتيرو، س. المعاهد الوطنية لعلوم وتكنولوجيا الكم، اليابان

جوانغ، ش. الجامعة الصينية للعلوم والتكنولوجيا، الصين

وتلقّى هذا المنشور دعماً قيِّماً من حكومة اليابان.

التقدم المحرز في ميدان الاندماج 1

محطات الاندماج 17

السياق والسيناريوهات 29

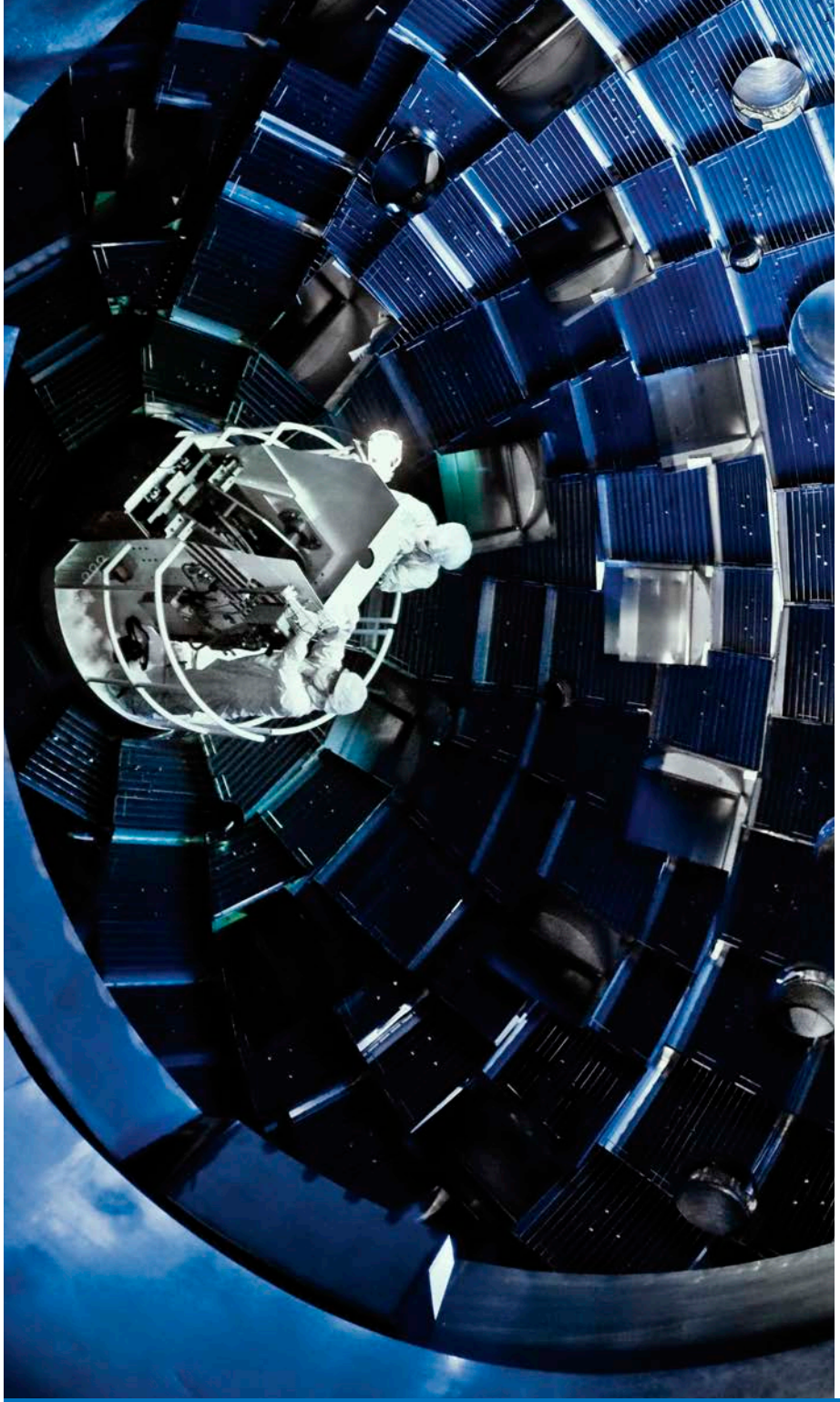
45 الآفاق

63 الاندماج في أرقام

التقدم الس
ميدان الا

محرز في اندماج

أوجه التقدم
والإنجازات
الحديثة.



1990

اتخاذ مرفق الإشعال الوطني قراراً رئيسياً

1980

جهاز الليزر نوفا (30 كيلوجول)

1970

جهاز الليزر شيف

جهاز الليزر أرغوس

نشر ورقة بحثية جوهرية

جهاز الليزر جانوس

1960

اختراع الليزر

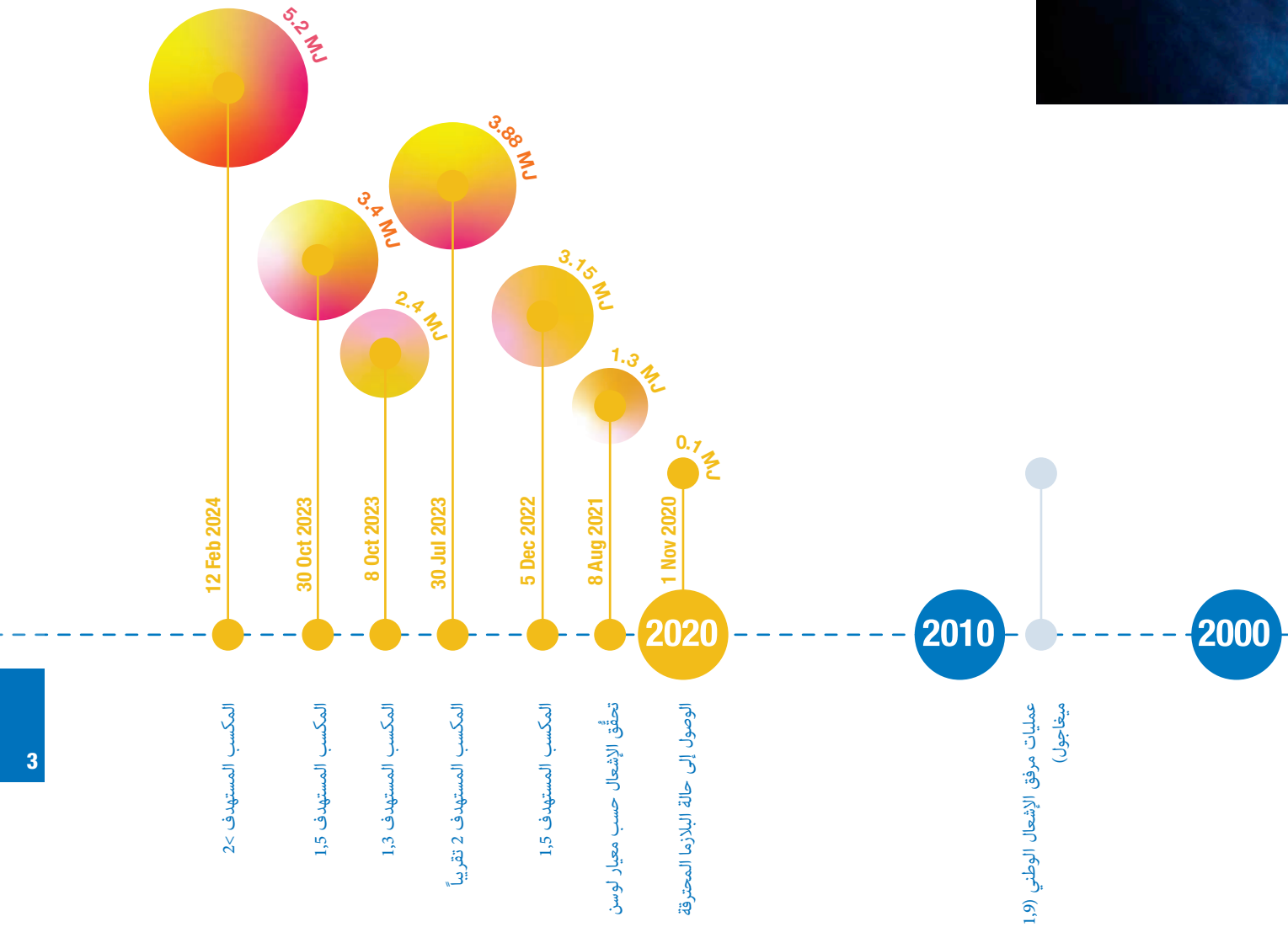
المفهوم الأول للاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي

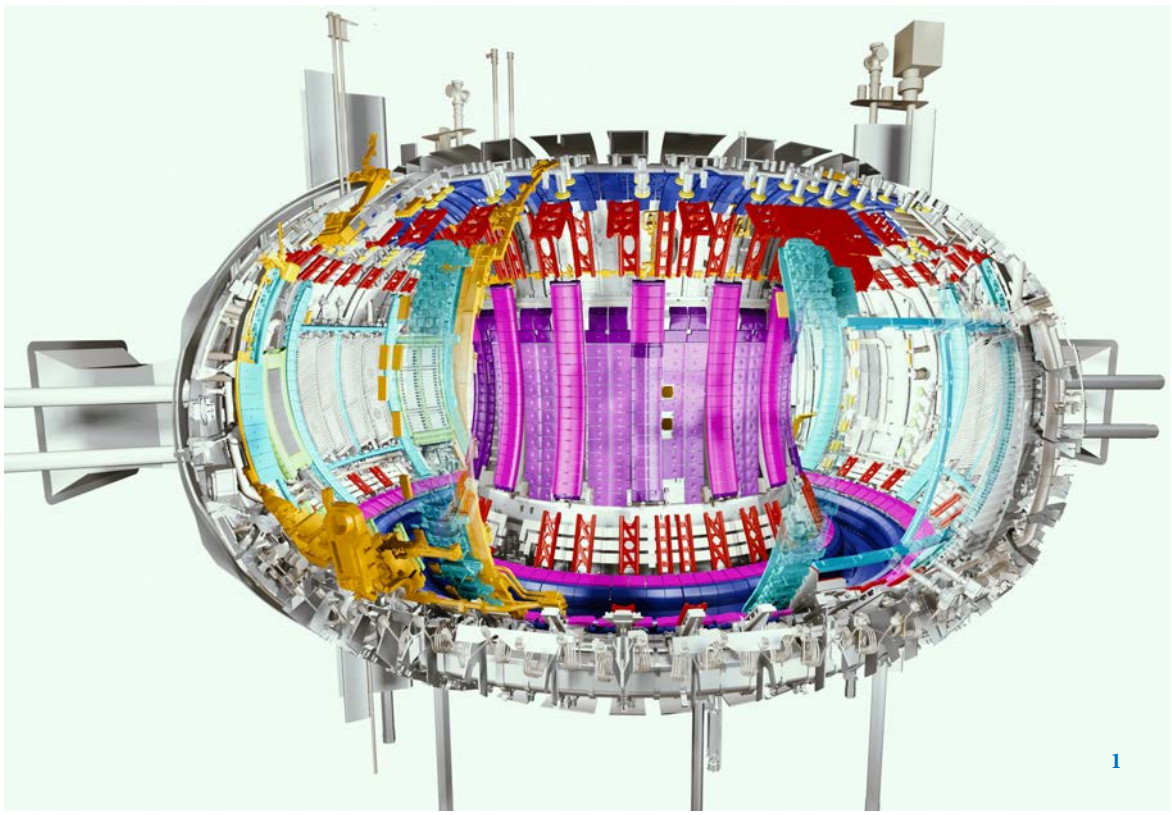
مرفق الإشعال الوطني يكرِّر إشعال طاقة الاندماج أربع مرات

استمرار التقدم في مرفق الإشعال الوطني (NIF)

منذ تحقيق إنجاز إشعال طاقة الاندماج في كانون الأول/ديسمبر 2022 [1]، تمكَّن الباحثون في مختبر لورانس ليفرمور الوطني، في الولايات المتحدة الأمريكية، من تكرار هذا الإنجاز العلمي الباهر بنجاح أربع مرات على الأقل. وكرَّر الباحثون إشعال طاقة الاندماج في أربع تجارب لاحقة خلال عام 2023 وفي مطلع عام 2024. وأنتجت أحدث تجربة مردوداً قياسياً قدره 5,2 ميغاجول ومكسباً يزيد على 2.▪

مرفق الإشعال الوطني في مختبر لورانس ليفرمور الوطني في الولايات المتحدة (الصورة مهداة من مختبر لورانس ليفرمور الوطني، الولايات المتحدة).





تحقيق مرفق الطارة الأوروبية المشتركة رقماً قياسياً عالمياً وبدء عملية الإخراج من الخدمة

بعد 40 عاماً من التشغيل وآخر تجارب الديوتيريوم-التريتيوم التي أُجريَت طوال عام 2023، بدأت عملية إخراج مرفق الطارة الأوروبية المشتركة (JET) من الخدمة وسيستمر العمل على ذلك حتى عام 2040 تقريباً. وسيوفِّر إخراج مرفق JET من الخدمة معلومات قيِّمة للأوساط المعنية بالاندماج لأنه سيتيح تحليل كيفية تغيُّر المواد داخل الوعاء مع مرور وقت التشغيل.

وحقَّق المرفق إنجازاً غير مسبوق في التجارب الأخيرة التي أجراها في كانون الأول/ديسمبر 2023 [2]. فقد أرسى العلماء رقماً قياسياً عالمياً عن طريق الحفاظ على تفاعل اندماجي متواصل لمدة 5 ثوانٍ، وهو ما أنتج 69 ميغاجول من الطاقة مع استخدام حد أدنى من الوقود. وقد استكشفوا تقنيات ابتكارية مثل عكس شكل البلازما لتحسين احتوائها. وفضلاً عن ذلك، تعمدوا توجيه حزمة عالية الطاقة من الإلكترونات، أُنتجَت خلال اختلالات البلازما، صوب الجدار الداخلي لإحراز التقدم في فهم آليات التحكم في الحزم والضرر المقترن بها.■

1 رسم للكابلات والمكونات والنظم داخل الوعاء في مرفق الطارة الأوروبية المشتركة (مهدى من هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة (UKAEA)، المملكة المتحدة).

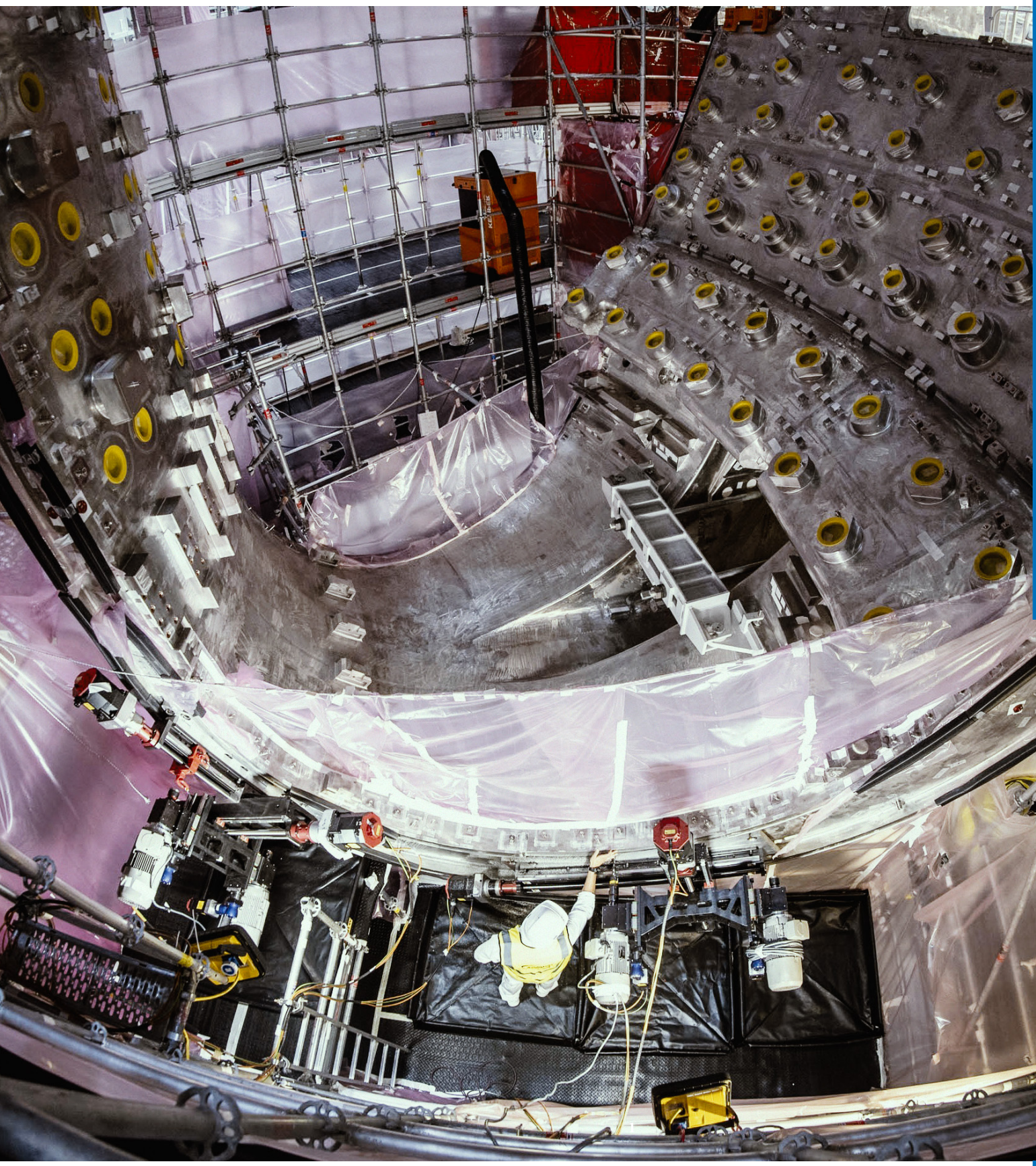
2 صورة جوية لموقع مفاعل إيتير التُقطت في تموز/يوليه 2024 (مهداة من مفاعل إيتير، فرنسا).

2

مفاعل إيتير يتقدَّم نحو خط أساس جديد

مرَّ مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير، ITER) بمرحلة انتقالية ويُحرز تقدُّم في وضع خط أساس جديد لهذا المشروع. وأعمال إصلاح المكونات الرئيسية جارية وفقاً للجدول الزمني المعتمد. وتواصَل إحراز التقدم في أعمال التشييد، والتصنيع، والتجميع، وإدخال النظم في الخدمة. وبعد استعراض دام أكثر من عام، قُدِّم اقتراح بشأن خط أساس جديد إلى المجلس المعني بمفاعل إيتير في حزيران/يونيه 2024، وباتت هذه الوثيقة الجدول المرجعي للعمل.

وأدى اكتشاف وتحليل أوجه عدم مطابقة هندسية في وصلات اللحام في عدد من قطع الأوعية الفراغية، والتصدعات الناجمة عن التآكل الذي يسببه الكلوريد في أنابيب تبريد الدروع الحرارية، إلى إبطاء عملية تجميع جهاز التوكاماك الخاص بمفاعل إيتير إلى حين انتهاء أعمال الإصلاح. وفي موازاة ذلك، أُجريَ تقييم للأسباب الجذرية، بما يشمل مراجعة ذاتية لثقافة جودة المشروع، وهو ما أفضى إلى عملية إعادة تنظيم للاستعداد للتحديات المقبلة. وأُجريَت مناقشات مستفيضة مع هيئة الأمان النووي الفرنسية لتحسين عملية إيضاح الأمان المصاحبة لإجراءات الترخيص لمفاعل إيتير. وفي الوقت نفسه، تم تركيب نظم الإمداد بالكهرباء، ومحطة التبريد الشديد، ونظام مياه التبريد، وأُدخل جزء كبير منها في الخدمة. وتم تسليم جميع الملفات المغناطيسية الخاصة بالمجالين القطبي والحلقي، شأنها في ذلك شأن معظم وحدات الملفات اللولبية المركزية وغير ذلك من المكونات الرئيسية.■



تمثلت أكبر المهام طيلة العام الماضي في إدراج هذه العناصر ضمن خط أساس واقعي ومحدَّث للمشروع.

وفي الاقتراح المنبثق من هذه الجهود، تم تثبيت مراحل التجميع والتشغيل التي تم تصوُّرها سابقاً. ويجري التخفيف من المخاطر التقنية والتشغيلية عن طريق تركيب المحرف وكتل التدريع والجدار الأول الساتر، وغير ذلك من المكونات الكفيلة بالحد من المخاطر، في جهاز أكثر اكتمالاً قبل التشغيل الأولي، وكذلك عن طريق إجراء اختبارات كاملة لبعض الملفات المغناطيسية الخاصة بالمجالين الحلقي والقطبي قبل التركيب.

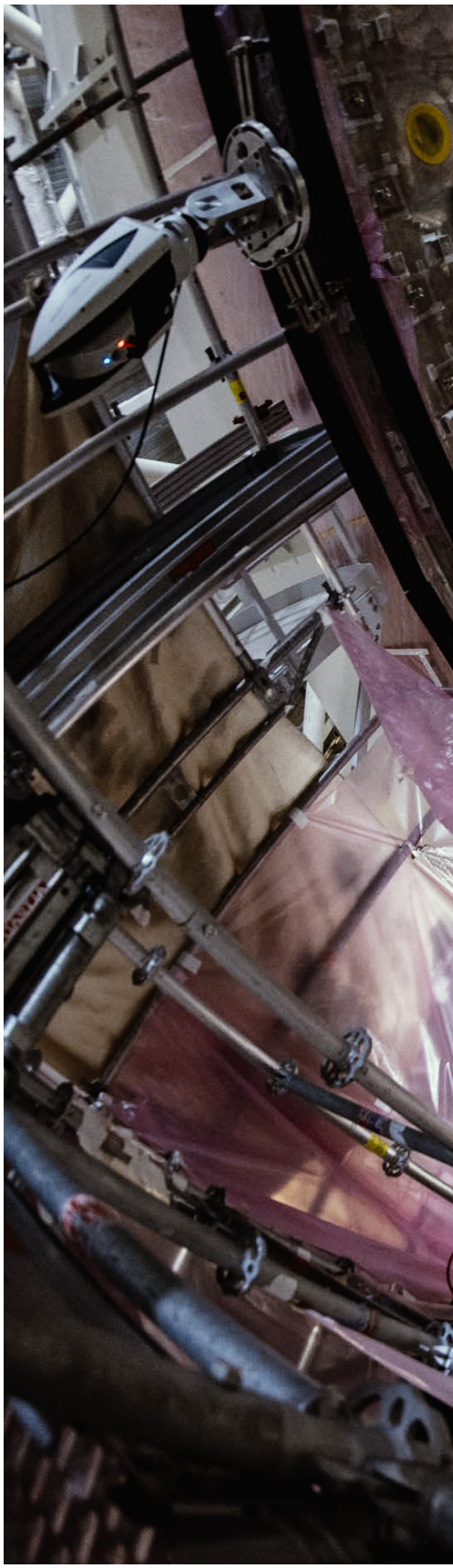
ووقت استهلال الأنشطة البحثية في عام 2034، سوف تبدأ فترة سبعة وعشرين شهراً ستشمل الكثير من التجارب مع بلازما الهيدروجين وبلازما الديوتيريوم-الديوتيريوم وستنتهي بتشغيل جهاز التوكاماك بالنبضات الطويلة وبكامل الطاقة المغناطيسية وتيار البلازما (15 ميغا أمبير) في عام 2036.

ويُذكر أن مرحلة الأنشطة البحثية ستوضِح إلى حد بعيد عند بدايتها تكامل النظم اللازمة لإجراء عمليات الاندماج على نطاق صناعي. وسوف يتم تأجيل انطلاق مرحلة عمليات الديوتيريوم-التريتيوم بواقع أربع سنوات مقارنةً بخط الأساس السابق، وذلك من عام 2035 إلى عام 2039. ■

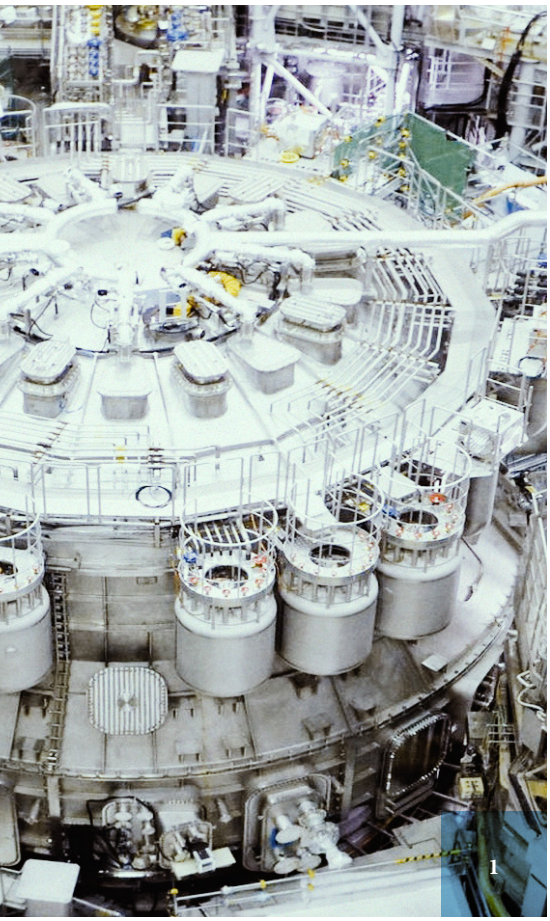
2034 بدء تجارب بلازما الهيدروجين وبلازما الديوتيريوم-الديوتيريوم

2036 بدء التشغيل بالنبضات الطويلة وبكامل الطاقة المغناطيسية وتيار البلازما

2039 بدء عمليات الديوتيريوم-التريتيوم



يؤدي علم القياس دوراً أساسياً في إصلاح قطع الأوعية الفراغية في مفاعل إيتير، بما يشمل تحديد المواقع بدقة ميكرومترية لوضع مكنات التفريز التي تزيل الفائض من المواد وتعيد المكون إلى حالته الأصلية (الصورة مهداة من مفاعل إيتير، فرنسا).

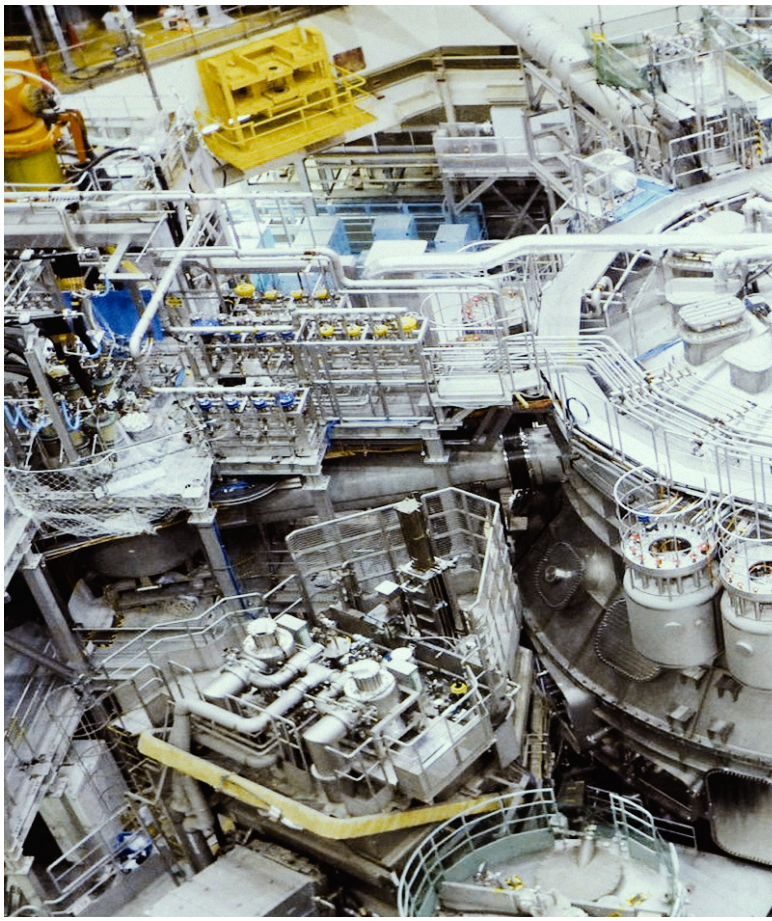


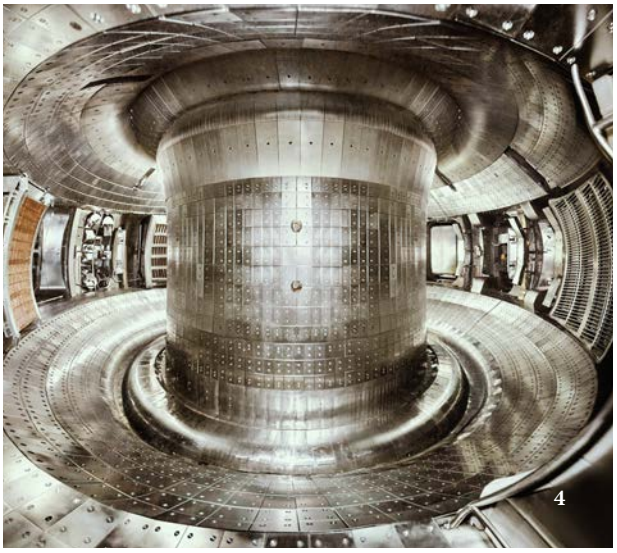
إحراز المزيد من التقدم منذ صدور العدد الأول من منشور "الآفاق العالمية في ميدان الاندماج"

أنتج جهاز التوكاماك JT-60SA البلازما لأول مرة [3]. والجهاز الذي يبلغ ارتفاعه أربعة طوابق مصمَّم لاحتجاز البلازما بعد تسخينها إلى 200 مليون درجة مئوية لمدة 100 ثانية تقريباً، وهي فترة أطول بكثير مما كانت تكفله أجهزة التوكاماك الكبيرة في السابق. وستكون البلازما في جهاز التوكاماك JT-60SA مشابهة إلى حد بعيد للبلازما المخطط لاستخدامها في مفاعل إيتير، ومن المتوقع أن تسمح للفيزيائيين بدراسة استقرار البلازما وكيفية تأثيره في إنتاج قوى الاندماج على نطاقات زمنية طويلة، ومن ثمَّ استخلاص دروس يمكن تطبيقها في الجيل المقبل من أجهزة التوكاماك. وفي مكان آخر في اليابان، تم تركيب النموذج الأولي للمعجل الخطي الخاص بالمرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية (IFMIF) في روكاشو، باليابان.■

وأجرى مرفق التوكاماك التجريبي المتقدم الفائق التوصيل (EAST) في الصين عملية احتواء محكم للبلازما في حالة مستقرة لمدة طويلة بلغت 403 ثوانٍ [4]. ويمثِّل هذا الإنجاز تحسناً نسبةً إلى الرقم القياسي الأول البالغ 101 ثانية الذي سجَّله مرفق التوكاماك EAST في عام 2017. وتمت زيادة درجة حرارة الجسيمات وكثافتها بصورة كبيرة في أثناء عملية الاحتواء المحكم للبلازما، مما سيحسِّن كفاءة محطات قوى الاندماج المستقبلية في توليد الكهرباء. ويُشار أيضاً إلى أن جهاز التوكاماك HL-3 في الصين عمِل لأول مرة في حالة الاحتواء المحكم مع تيار بلازما بلغت شدته مليون أمبير، ويُعزى ذلك إلى تطوير نظم التسخين والتشغيل والتحكم والتشخيص والإمداد بالكهرباء.■

وحقَّق الباحثون الذين يعملون على مرفق التوكاماك البحثي المتقدم الفائق التوصيل في كوريا (KSTAR)، في المعهد الكوري لطاقة الاندماج، رقماً قياسياً إذ تمكنوا من بلوغ درجة حرارة قدرها 100 مليون درجة مئوية لمدة 48 ثانية والحفاظ على حالة الاحتواء المحكم للبلازما لفترة تزيد على 100 ثانية. ويلي هذا الإنجاز النجاح الذي حقَّقوه سابقاً حين حافظوا على حالة الاحتواء المحكم للبلازما لمدة 30 ثانية في عام 2021، وهو ما مثَّل تقدماً بارزاً في بحوث طاقة الاندماج. ويرمي الباحثون المعنيون بمرفق التوكاماك KSTAR إلى الحفاظ على درجة حرارة البلازما عند 100 مليون درجة مئوية لفترة 300 ثانية بحلول عام 2026. وتماشياً مع القرار الذي اتُخذ في مفاعل إيتير بالاستعاضة عن محرف البريليوم بمحرف التنجستن، بات مرفق التوكاماك KSTAR يعمل بمحرف التنجستن.■



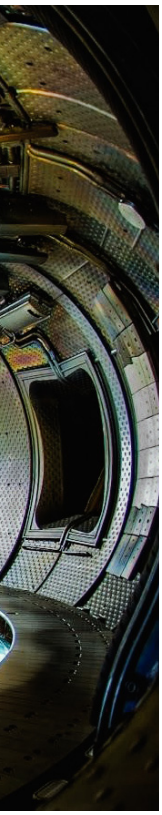


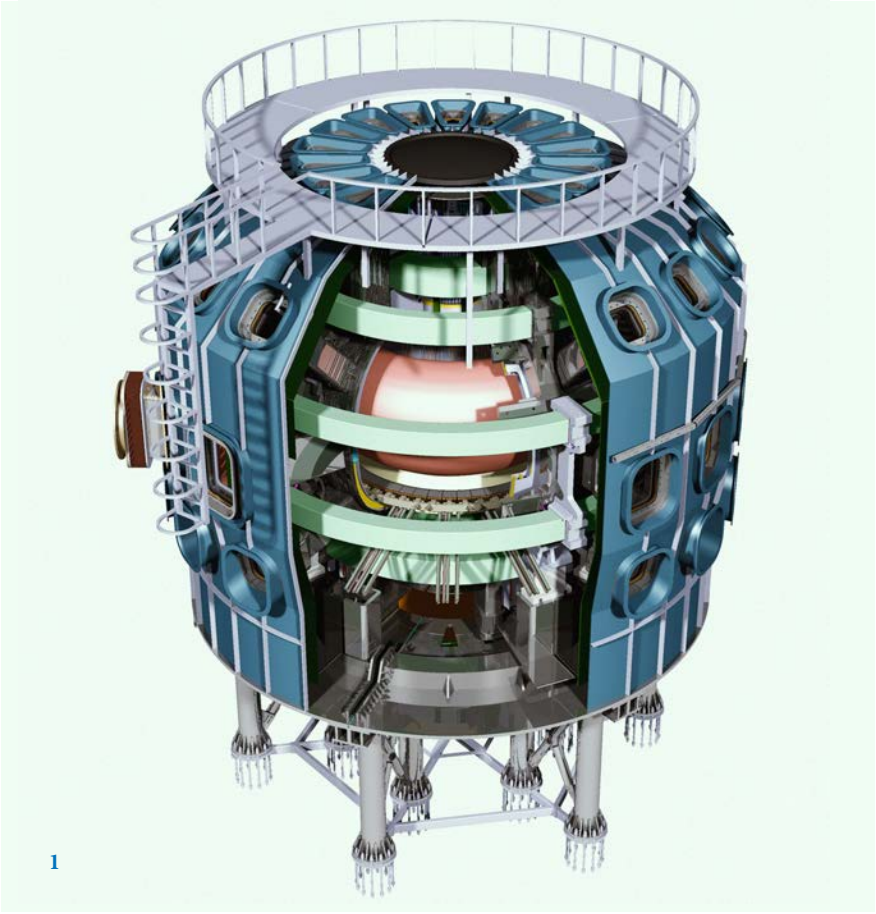
1 الجهاز المعروف باسم JT-60SA هو أكبر جهاز توكاماك قيد التشغيل، وقد تم تصميمه وتشييده بصورة مشتركة بين اليابان والاتحاد الأوروبي (الصورة مهداة من المعاهد الوطنية لعلوم وتكنولوجيا الكم، اليابان).

2 مرفق التوكاماك KSTAR في المعهد الكوري لطاقة الاندماج (الصورة مهداة من المعهد الكوري لطاقة الاندماج، جمهورية كوريا).

3 المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، يزور النموذج الأولي للمعجل الخطي الخاص بمرفق IFMIF في معهد روكاشو للاندماج خلال زيارته إلى اليابان (الصورة مهداة من المعاهد الوطنية لعلوم وتكنولوجيا الكم، اليابان).

4 داخل مرفق التوكاماك EAST (الصورة مهداة من معهد فيزياء البلازما، أكاديمية العلوم الصينية، الصين).

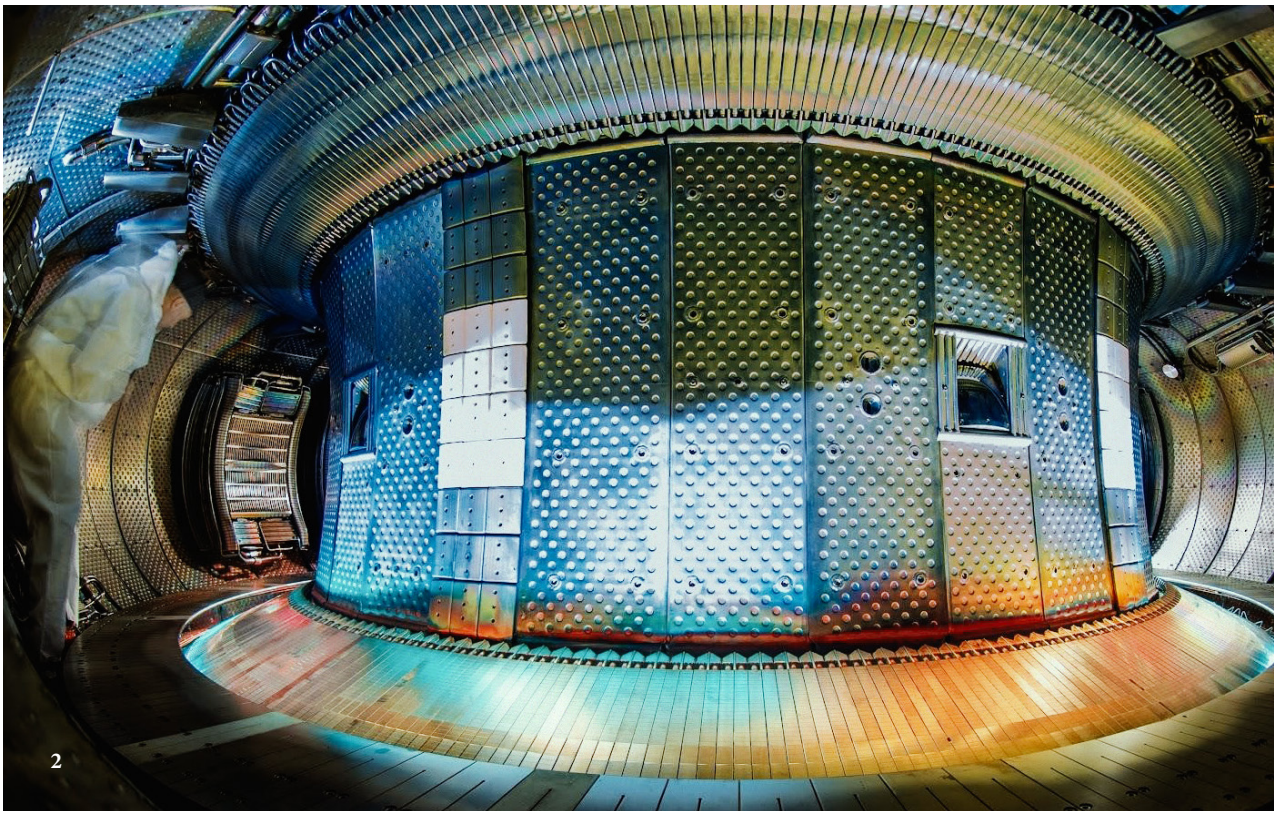




1

وفي إيطاليا، استمر التقدم في تشييد مرفق اختبار جهاز التوكاماك القائم على محرف (DTT)، وهو جهاز جديد فائق التوصيل مكرَّس لدراسة الحلول القائمة على المحرفات المتقدمة لأغراض محطات الاندماج. ويضم الاتحاد المعني بمرفق DTT الذي يتولى تنفيذ المشروع العديد من المؤسسات البحثية الإيطالية والشركاء الدوليين، بما يشمل واحدة من أكبر شركات الطاقة في العالم، وقد جمع ما يقارب 500 مليون يورو لتشييد المرفق. وتتمثل المهمة الرئيسية لمرفق DTT في استكشاف واختبار الفيزياء والتكنولوجيا المتعلقة بمفاهيم تفريغ القوى من البلازما التي يمكن استخدامها في محطة القوى الإيضاحية الأوروبية (EU-DEMO).■

ومثلما هي الحال مع مرفق KSTAR، فإن مرفق التوكاماك الفرنسي WEST، القائم في موقع المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة في كاداراش، بدأ أيضاً العمل بنجاح مع محرف التنجستن. وخلال الحملة التجريبية الأولى، أُنتج تدفق نيوتروني عالٍ من خلال سلسلة من نبضات البلازما دامت كل نبضة منها نحو دقيقة واحدة، وهو ما أظهَر قوة تحمُّل هذا المكون الجديد وأداءه. وفضلاً عن ذلك، فإن الباحثين في المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة وفي مختبر برينستون لفيزياء البلازما في الولايات المتحدة بلغوا، في إطار عمل تعاوني، محطة بارزة عن طريق الحفاظ على بلازما الاندماج عند درجة حرارة قدرها 50 مليون درجة مئوية تقريباً، وذلك لوقت قياسي هو ست دقائق [5]. ويُشار إلى أن هذا الإنجاز، الذي شمل ضخ المزيد من الطاقة بنسبة 15% ومضاعفة كثافة البلازما مقارنةً بالمحاولات السابقة، يبرِز الإمكانات التي توفِّرها أجهزة الاندماج المكسوة بالتنجستن في محطات الاندماج المستقبلية.■



1 رسم لمرفق DTT (مهدى من الاتحاد المعني بمرفق DTT، إيطاليا).

2 مرفق التوكاماك WEST المجهَّز بمحرف التنجستن المبرَّد تبريداً نشطاً (الصورة مهداة من المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة، فرنسا).

واستُكملت في مرفق الاندماج الوطني DIII-D في الولايات المتحدة، الذي تشغِّله شركة General Atomics لصالح وزارة الطاقة الأمريكية، عمليات تحديث رئيسية شملت نظماً جديدة للتحكم في البلازما، وأدوات تشخيص متقدمة، ونظماً محسَّنة للتسخين ودفع التيار، وتحسينات في نظام المحرف. ونتيجةً لعمليات التحديث هذه، أصبح مرفق DIII-D مجهزاً بأدوات متقدمة تضمن تشغيله بطريقة تتماشى مع احتياجات محطة اندماج. وقبيل إجراء عمليات التحديث، أفضت التجارب في مرفق DIII-D إلى تحقيق كثافة عالية واحتواء محكم

1 تم تسلُّم الوعاء الفراغي الفولاذي لجهاز SPARC في عام 2024 (الصورة مهداة من شركة Commonwealth Fusion Systems، الولايات المتحدة).

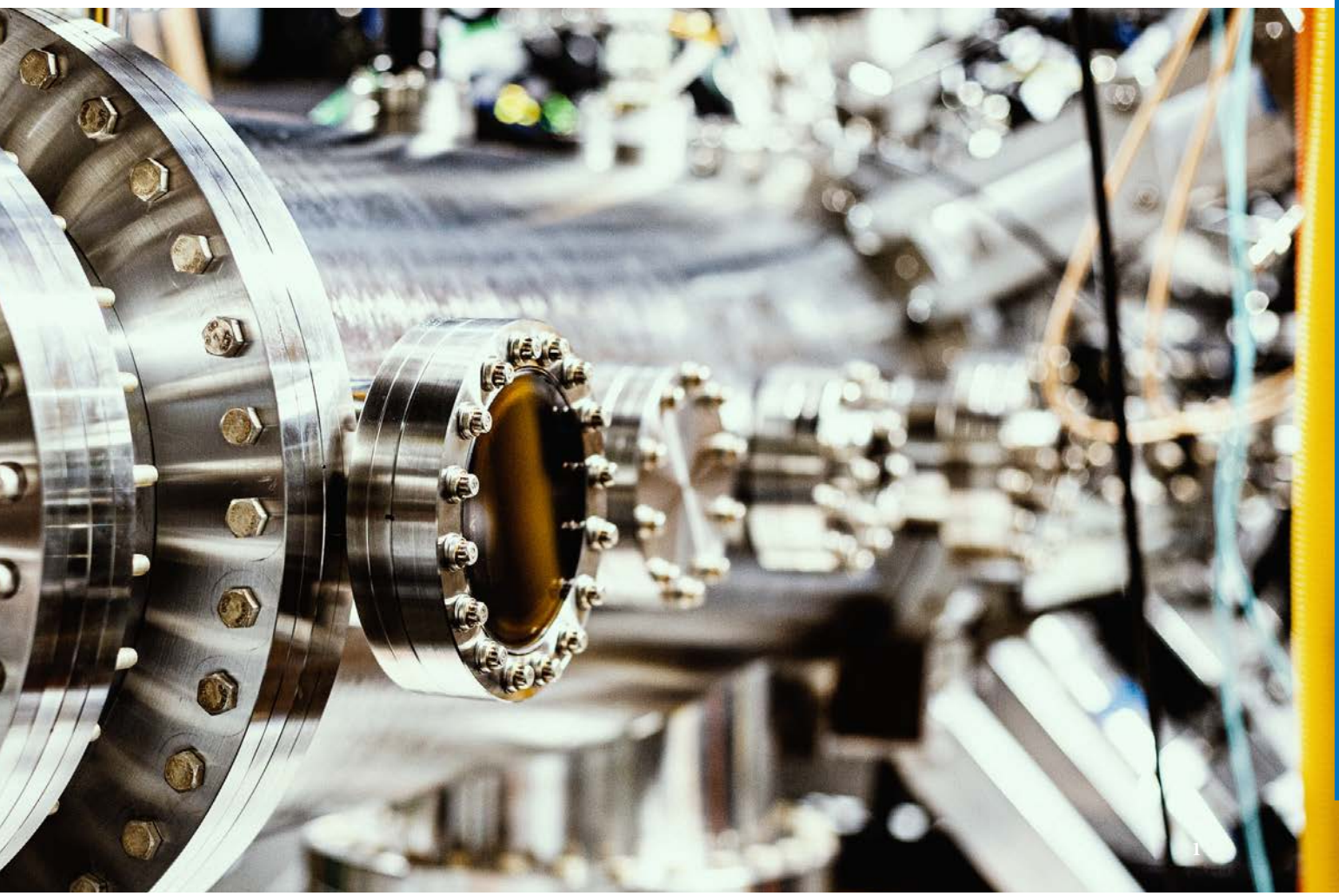
2 المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، يزور قاعة جهاز التوكاماك SPARC التي تمت تهيئتها لتجميع مكونات الجهاز.

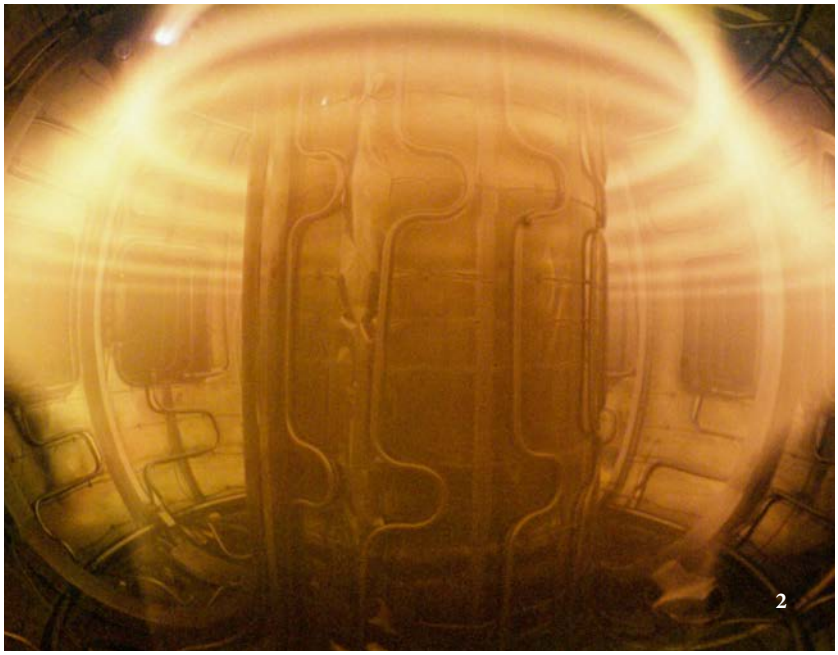
للوقود في آن واحد. وهذه هي المرة الأولى التي يتم فيها التوصل إلى هذا المستوى من الكثافة والاحتواء في الوقت ذاته [6]. ويدعم هذا النظام التشغيلي متطلبات أساسية في الكثير من تصاميم محطات الاندماج في شتى أنحاء العالم وقد يفتح الطريق أمام إنتاج طاقة اندماج جذابة من الناحية الاقتصادية. وإضافةً إلى ذلك، برهن الباحثون في مختبر برينستون لفيزياء البلازما خلال تجاربهم في مرفق DIII-D أن نموذج الذكاء الاصطناعي لديهم، الذي تم تدريبه بالاستناد حصراً إلى بيانات التجارب السابقة، قد يتنبأ بحالات عدم الاستقرار المحتملة في البلازما - التي تُعرف باسم حالات عدم الاستقرار المقترنة بالتمزق - بما يصل إلى 300 جزء من ألف جزء من الثانية قبل حدوثها [7]. وتمكَّن جهاز التحكم القائم على الذكاء الاصطناعي من التنبؤ بحالات عدم الاستقرار وتجنبها قبل حصولها، وهو أمر يمهد الطريق لاستحداث جهاز تحكم من شأنه أن يدعم نظام بلازما مستقراً وعالي القدرة في الوقت الفعلي في محطات الاندماج.■

وأحرزت شركة Commonwealth Fusion Systems (CFS) تقدماً مطرداً في الأعمال المضطلع بها في موقع تشييد جهاز التوكاماك SPARC الذي يُتوقَّع أن يحقِّق مكسباً علمياً صافياً في الطاقة. وتم بلوغ محطة بارزة مع تسلُّم الوعاء الفراغي. ومن المرتقب أن يدخل جهاز SPARC مرحلة التشغيل في عام 2025 وأن يثبت إمكانية تحقيق مكسب علمي صافٍ في الطاقة. ومن المتوقع أن يُستكمل مشروع ARC، الذي سيخلف جهاز SPARC، بحلول منتصف ثلاثينيات هذا القرن، والهدف منه هو إثبات إمكانية إنتاج الكهرباء.■

3 مهندس داخل مرفق DIII-D يركِّب معدات تشخيص جديدة (الصورة مهداة من شركة General Atomics، الولايات المتحدة).

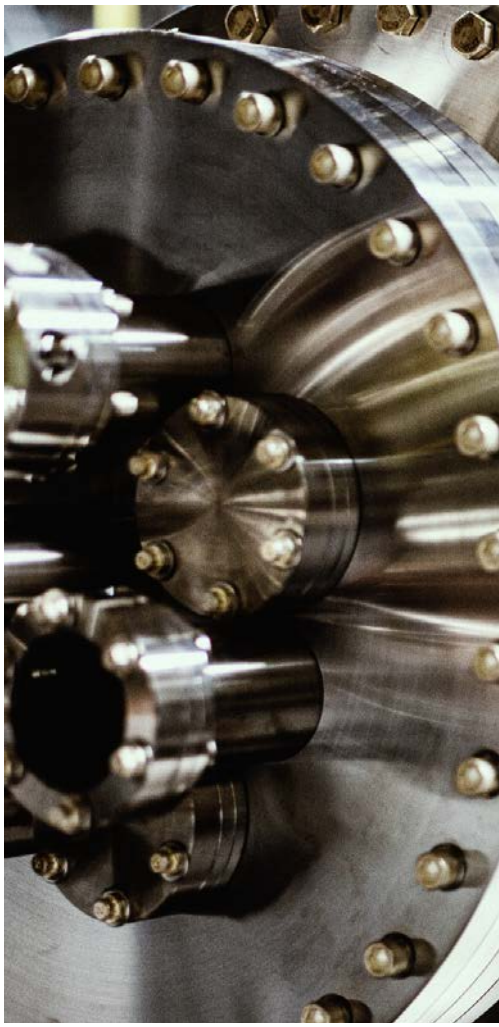
الذكاء الاصطناعي للتحكم في البلازما في مجال طاقة الاندماج، من المنصة الإلكترونية المعروفة باسم "الذكاء الاصطناعي من أجل الصالح العام" (AI for Good)





1 تجربة الاحتواء زيتا الخاصة بالاندماج التي أجرتها شركة Zap Energy والمعروفة باسم FuZE (الصورة مهداة من شركة Zap Energy، الولايات المتحدة).

2 داخل جهاز التوكاماك HH70 الذي بدأ تشغيله في حزيران/يونيه 2024 (الصورة مهداة من شركة Energy Singularity، الصين).



وفي إطار تجربة الاحتواء زيتا الخاصة بالاندماج التي أجرتها شركة Zap Energy والمعروفة باسم FuZE، وصلت درجة حرارة إلكترونات البلازما إلى ما يتراوح بين 1 و3 كيلو إلكترون فولت [8]، وهو ما يزيد على 10 ملايين درجة مئوية. وتقدَّم أداء هذا الجهاز ليبلغ مستوى مماثلاً لمستوى أداء أبرز أجهزة الاندماج التجريبية في العالم. وفي الوقت نفسه، بدأت أيضاً عملية تطوير محطة اندماج قائمة على التكنولوجيا ذاتها.■

وأُنتجت البلازما لأول مرة في جهاز التوكاماك الفائق التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة الذي طوَّرته شركة Energy Singularity، وهو جهاز رائد يُعرف باسم HH70. ولهذا الجهاز مجال مغناطيسي حلقي تساوي شدته 0,6 تسلا، ونصف قطر رئيسي يبلغ 0,75 متر، ونظام يتألف من 26 مغناطيساً فائق التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة. وفيما يخص المرحلة المقبلة، تخطط شركة Energy Singularity لتطوير جهاز توكاماك من الجيل المقبل فائق التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة له مجال مغناطيسي عالي الشدة، يُعرف باسم HH170، والهدف منه هو تحقيق مكسب في الطاقة يزيد على 10 في حال استخدام وقود الديوتيريوم-التريتيوم.■

محطات الاندماج

هناك ما لا يقل عن 20 مفهوماً خاصاً بمحطات الاندماج في مراحل مختلفة من التطوير في كندا والصين وألمانيا وإسرائيل واليابان وجمهورية كوريا والاتحاد الروسي والسويد والمملكة المتحدة والولايات المتحدة، وتتراوح المواعيد المستهدفة لاستكمالها بين أواخر عشرينيات وأواسط خمسينيات هذا القرن.

ويطوِّر هذه المفاهيم عدد من الحكومات والشركات الخاصة وبعض من المشاريع المشتركة بين القطاعين العام والخاص.

معايير نجاح محطة اندماج تجريبية [9، 10]

الفئة	المعايير
الاندماج والأداء من حيث الطاقة الكهربائية	1- 100-500 ميغاواط المتوسط الزمني لصافي القوى الحرارية الناتجة من الاندماج 2- ≤50 ميغاواطاً (كهربائياً) الكهرباء المولَّدة حين يكون الطلب مرتفعاً 3- Q_e >1 4- تُشغَّل لعدة دورات بيئية[1]
المكونات	5- الاستراتيجية والتكلفة والنطاق الزمني لإزالة المكونات التي تتردى حالتها ولاستبدالها كميزة تصميمية
الوقود والرماد	6- إمكانية توسيع نطاق مفهوم إزالة الرماد لاستخدامه في أول محطة اندماج من نوعها 7- المكونات المواجهة للبلازما التي يمكن أن تتحمل الأضرار الناجمة عن رماد الهليوم في بيئة تمثِّل أول محطة قوى اندماج من نوعها 8- نسبة توليد التريتيوم >0,9 9- مخزون التريتيوم ≥1 كيلوغرام 10- الابتكارات في علوم حدود البلازما وتكنولوجيات التزويد بالوقود ومعالجة الغاز 11- التريتيوم، آلية حصر محددة بوضوح فضلاً عن أساليب تحليلية يمكن أن تفي بمتطلبات الحصر
الموثوقية واللياقة التشغيلية	12- إجراء أعمال الصيانة والاستبدال عن بُعد 13- مكونات نمطية يمكن استبدالها
الاعتبارات المتعلقة بالبيئة والأمان	14- التخفيف من انبعاثات التريتيوم 15- التقليل إلى أدنى حد من حجم النفايات والأخطار بوجه عام وتجنب النفايات التي تندرج في فئة أعلى من الفئة جيم قدر الإمكان 16- التخلص من النفايات النشطة
الاقتصاديات	17- تكاليف التشييد الليلية أقل من 5-6 مليارات دولار أمريكي

[1] تشمل الدورة البيئية في محطة اندماج تركيب المكونات الأساسية، وتشغيل المحطة إلى أن تتردى حالة هذه المكونات، ثم القيام بأعمال صيانة لمواصلة العمليات. وعلى الرغم من أن مدة هذه الدورة غير محددة بدقة ويمكن أن تختلف باختلاف التصاميم، فإنها تقارب في العادة عاماً من التشغيل بكامل قدرة المحطة قبل بروز الحاجة إلى أعمال صيانة أو إصلاح في محطة قوى اندماج تكون الأولى من نوعها.

ملحوظة: المعايير المظللة باللون الرمادي تخص محطات الاندماج القائمة على وقود الديوتيريوم-التريتيوم.

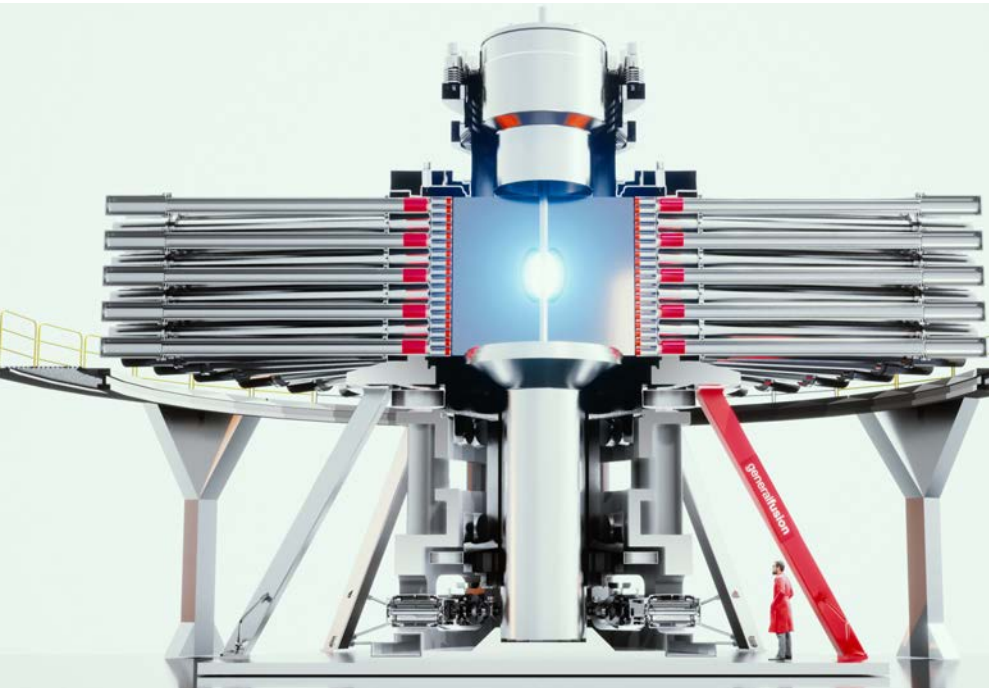
محطة General Fusion (شركة General Fusion، كندا)

ترمي شركة General Fusion إلى تشييد أول محطة اندماج في العالم قائمة على المستهدفات الممغنطة بحلول فترة تتراوح بين مطلع وأواسط ثلاثينيات هذا القرن. وبفضل بطانة من الفلز السائل في جهاز الاندماج، تُضغط ميكانيكياً بمجموعة من المكابس، تُهيأ ظروف الاندماج بنبضات قصيرة بدلاً من إيجاد عملية مستدامة. ولا يستلزم هذا التصميم الفريد مغناطيسات فائقة التوصيل ولا مجموعة من الليزرات، وهو يرمي إلى معالجة مسائل تحلُّل المواد، وإنتاج الوقود، واحتجاز الطاقة، والعوائق المتصلة بالتكاليف التي تعرقل الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج. ووفقاً للتصميم الحالي، يُفترض أن تنتج محطة قوى تابعة لشركة General Fusion ما يقارب 300 ميغاواط (كهربائي) من جهازين بقدرة 150 ميغاواطاً يعملان بصورة متزامنة لتوفير الكهرباء الخالية من الكربون بأسعار تنافسية.

وفي كانون الثاني/يناير 2024، أكدت النتائج التي خضعت لاستعراض نظراء أن شركة General Fusion قادرة على ضغط تجويف الفلز السائل

بطريقة سلسة وسريعة ومتناسقة، وهو أمر يُعَدُّ ضرورياً في محطة قوى تجارية. وفي آذار/مارس 2024، حقَّقت الشركة أيضاً إنجازات في نمذجة بطانة الفلز السائل في جهاز تجاري عن طريق تطوير شفرة حاسوبية مسجلة الملكية تتيح اختبار تصاميم ونسق مختلفة لأغراض محطة قوى.

وتعمل شركة General Fusion على بناء جهاز اندماج تجريبي يُعرف باسم Lawson Machine 26 (أو LM26) لتحقيق إنجازات تقنية ستفضي إلى التخفيف من المخاطر وتسريع وتيرة التقدم نحو تشييد محطة قوى. وجهاز LM26 مصمَّم لإيجاد ظروف الاندماج مع درجة حرارة تزيد على 100 مليون درجة مئوية بحلول عام 2025، فضلاً عن مكسب علمي صافٍ في الطاقة بحلول عام 2026. وستُدرج البيانات المستمدة من جهاز LM26 في التصميم الخاص بجهاز الشركة المخطط لاستخدامه على نطاق تجاري.■



رسم للشكل المحتمل لجهاز LM26
(مهدى من شركة General Fusion، كندا).

2040
5+
Chinese Consortium، وENN Science and Technology Development، وFocused Energy، وLaserFusionX، وUK Industrial Fusion Solutions

2045
4+
Gauss Fusion، وNeo Fusion، و Japanese Consortium، وShine Technologies

2050
3+
EUROfusion، وKorean Consortium، وIndian Consortium

2055
1+
Russian Consortium

1 مخطط محتمل لمحطة الاندماج EU-DEMO (مهدى من اتحاد EUROfusion، ألمانيا)

2 تصوُّر فني لمفاعل اختبار هندسة الاندماج الصيني (مهدى من الجامعة الصينية للعلوم والتكنولوجيا، الصين).

3 رسم لمحطة Gauss GIGA (مهدى من شركة Gauss Fusion، ألمانيا).

مفاعل اختبار هندسة الاندماج الصيني (الاتحاد الصيني Chinese Consortium، الصين)

مفاعل اختبار هندسة الاندماج الصيني (CFETR) هو مفهوم محطة اندماج قائم على تصميم جهاز التوكاماك التقليدي، يطوِّره حالياً اتحاد وطني في الصين. ومفاعل CFETR هو الجهاز المقبل في خارطة الطريق التي وضِعَت لتوليد طاقة الاندماج في الصين. ويُتوقَّع استكمال أعمال التشييد بحلول عام 2040. ومن المرتقب أن يفضي مفاعل CFETR إلى سد الثغرات بين مفاعل إيتير ومحطة اندماج، وإلى إثبات إمكانية تحقيق مكسب صافٍ في الكهرباء وعامل تشغيل قدره 0,5. وستندرج البحوث المتعلقة بمفاعل CFETR وخطة تطويره في مرحلتين. وخلال المرحلة الأولى، ستركز الجهود على ضمان التشغيل في حالة مستقرة وإيضاح الاكتفاء الذاتي من حيث التريتيوم مع قوى اندماج تصل إلى 200 ميغاواط. وستُعالج في هذه المرحلة مسائل متصلة بأنشطة البحث والتطوير في مجال فيزياء البلازما المحترقة لتأكيد إمكانية التوصل إلى تشغيل متقدم في حالة مستقرة. أما المرحلة الثانية، فستركز على التثبت من التكنولوجيا الخاصة بالمحطة مع قوى اندماج تزيد على 1 غيغاواط. وتتمثل إحدى النتائج الرئيسية التي ستفضي إليها المرحلة الثانية في إنشاء قاعدة بيانات خاصة بالموثوقية، والملاءمة التشغيلية، وقابلية الصيانة، وقابلية التفتيش (RAMI)[1] لتصميم محطة تجارية. وفيما يلي بعض من الخصائص المفاهيمية لمفاعل CFETR: نصف قطر رئيسي يبلغ 7,2 أمتار، ونصف قطر فرعي يبلغ 2,2 متر، وبلازما مطوَّلة K_{95}=2، وتيار بلازما شدته 14 ميغا أمبير، ومجال مغناطيسي على محور 6,5 تسلا، وبيتا معيرة β_N=2,3، ومكسب علمي متوقع في الطاقة Q_{sci}=20.■

محطة القوى الإيضاحية الأوروبية EU-DEMO (اتحاد مختبرات الاندماج الأوروبية (Eurofusion)، الاتحاد الأوروبي)

محطة EU-DEMO هي مفهوم محطة اندماج قائم على تصميم جهاز التوكاماك التقليدي، يطوِّره في أوروبا اتحاد مختبرات الاندماج الأوروبية (EUROfusion). وهذه المحطة هي المرفق الذي يُتوقَّع أن يليَ مفاعل إيتير في خارطة الطريق الأوروبية لإنتاج الكهرباء من الاندماج. والمشروع هو حالياً في مرحلة التصميم المفاهيمي ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل المحطة بحلول عام 2050. وترمي محطة EU-DEMO إلى إيضاح الجدوى التكنولوجية والاقتصادية لطاقة الاندماج عن طريق إنتاج نحو 500 ميغاواط (كهربائي) من صافي الكهرباء وتحقيق الاكتفاء الذاتي من حيث التريتيوم. وتجري حالياً دراسة عدة خيارات تصميمية. وسيكون لهذه الخيارات تأثير في العديد من تكنولوجيات المحطة، بما يشمل نسق المحرف وحلول دُثُر التوليد، بين جملة أمور أخرى. ومن المتوقع أن يرتكز التصميم المفاهيمي التمهيدي لمحطة EU-DEMO على نصف قطر رئيسي يقارب 9 أمتار وقوى اندماج تقارب 2 غيغاواط. وينصب التركيز الآن على تقليص حجم الجهاز والتقليل من المخاطر التقنية لتيسير النشر المبكر.■

محطة Gauss GIGA (شركة Gauss Fusion، ألمانيا)

ترمي شركة Gauss Fusion إلى تصميم وتطوير محطة Gauss GIGA، وهي محطة اندماج لتوليد الكهرباء بقدرة الغيغاواط، قائمة على تصاميم الستيلاريتور بحلول عام 2045. وسيُنفَّذ هذا المشروع من خلال شراكة بين القطاعين العام والخاص مع مؤسسات وطنية وأوروبية. ونسبة نصف القطر الرئيسي إلى نصف القطر الفرعي عالية نسبياً في التصميم الأساسي الحالي، وسيكون احتمال تحقُّق تفاعل اندماجي مماثلاً لذلك القائم في مفاعل إيتير، وهو ما يتيح استخدام مغناطيسات وأوعية فراغية تندرج في إطار قدرات قطاع الصناعة على صعيد الإنتاج والشحن والتركيب.

وتعتزم شركة Gauss Fusion تسريع وتيرة عملية النشر بتجنب الحاجة إلى أجهزة تجريبية أو إيضاحية وسيطة. وسيتم تحقيق ذلك عن طريق الاستفادة من عملية متعددة المراحل لإدخال أول محطة اندماج من نوعها في الخدمة. ومن المتوقع أن تُجرى عملية الإدخال في الخدمة على مراحل صُمِّم كل منها لجمع أكبر قدر ممكن من البيانات ولإتاحة القيام بأعمال توسيع وتحديث تشغيلية بصورة متواصلة. وستبدأ العملية مع جهاز بلازما أولي، وسيلي ذلك إيضاح كيفية عمل نظام صيانة عن بُعد، وسيتم الانتقال بعد ذلك إلى جهاز قادر على استخدام التريتيوم، وستُعتمد أخيراً دورة وقود وعملية لتوليد الكهرباء متواصلتان بلا أي انقطاع.

ويُتوقَّع أن يتيح هذا النهج التدريجي تطوير التكنولوجيا اللازمة على أساس أطر زمنية غير مترابطة وتحسين البارامترات ونظم التشخيص ونظم التحكم. ويُفترض أن يسهِّل النهج أيضاً جمع بيانات بالغة الأهمية بشأن المواد.■

محطة Proxima Fusion (شركة Proxima Fusion، ألمانيا)

تركز شركة Proxima Fusion على أجهزة ستيلاريتور شبه متساوية الدينامية ذات مجال مغناطيسي عالي الشدة، باستخدام تكنولوجيا المغناطيسات الفائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة. وترتكز مفاهيم الشركة المتعلقة بمحطة الاندماج على جهاز الستيلاريتور Wendelstein 7-X (W7-X) الابتكاري في ألمانيا، حيث وضِعَت لأول مرة مبادئ تحسين نسق أجهزة الستيلاريتور شبه المتساوية الدينامية وصولاً إلى المستوى الأمثل ونهج محرف الجزر المغناطيسية. وتستند تصاميم محطة شركة Proxima Fusion إلى تكنولوجيا المغناطيسات الفائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة لأن شدة المجال المغناطيسي تبلغ بهذه الطريقة مستويات لا يمكن بلوغها من خلال المغناطيسات الفائقة التوصيل التقليدية (في درجات الحرارة المنخفضة)، ويُستخدم في هذا الصدد تصميم حاسوبي متكامل لتخطي الحدود الهندسية السابقة المقترنة بهياكل الدعم. وترتكز تصاميم أجهزة الستيلاريتور شبه المتساوية الدينامية الخاصة بشركة Proxima Fusion على التسخين بواسطة الرنين السيكلوتروني الإلكتروني العالي التردد ودُثُر التوليد المبردة بالماء التي يُستخدم فيها الليثيوم والرصاص.■

جهاز Tao (شركة nT-Tao، إسرائيل)

شركة nT-Tao هي شركة إسرائيلية ناشئة تعمل على تصميم محطة اندماج يقارب حجمها حجم حاوية شحن. ومن شأن النظام أن يزوِّد شبكة كهربائية قائمة بما يتراوح بين 10 ميغاواطات و20 ميغاواطاً من الكهرباء أو أن يكون بمثابة جهاز مستقل يمكن تغيير حجمه لتوفير الطاقة في الأماكن البعيدة. وتعتزم شركة nT-Tao التوصل إلى تصميم نموذجي تجاري بحلول نهاية هذا العقد. ويستند الحل الذي تقترحه شركة nT-Tao إلى وسيلة مسجلة الملكية لتسخين البلازما باستخدام النبضات وطوبولوجيا غرفة مغناطيسية قائمة على طارة مستقرة ديناميا. ويرمي نهج شركة nT-Tao إلى تقليص حجم الجهاز بما يتيح إجراء عمليات تطوير تكرارية سريعة وخفض التكاليف والحد من درجة تعقيد التصميم.■

[1] يتألف مختصر RAMI من الأحرف الأولى من كلمات "reliability, availability, maintainability and inspectability"، أي الموثوقية، والملاءمة التشغيلية، وقابلية الصيانة، وقابلية التفتيش. وهو يصف عملية يتمثل هدفها الرئيسي في التأكد من موثوقية جميع نظم محطة الاندماج في مرحلة التشغيل، والحفاظ على أدائها في الظروف التشغيلية، مع أفضل لياقة تشغيلية ممكنة.

محطة القوى Helical Fusion (شركة Helical Fusion، اليابان)

تهدف شركة Helical Fusion إلى تطوير محطة اندماج مستقرة الحالة بحلول عام 2034، وثمة خطط لاستغلال المحطة استغلالاً تجارياً في أربعينيات هذا القرن. وتقوم المحطة على نسق هليوترون مع ملفين حلزونيين وترتكز على تكنولوجيات الموصلات الفائقة في درجات الحرارة المرتفعة ودُثُر الفلز السائل. ويسمح الموصل الفائق في درجات الحرارة المرتفعة، الذي يتسم بالمرونة وبكثافة تيار عالية، بتركيب ملفات حلزونية متضامة. ويحمي دثار الفلز السائل جميع الجدران المواجهة للبلازما ويتيح توليد الكهرباء بدرجة عالية من الكفاءة. وإضافةً إلى ذلك، يتيح تصميم الهليوترون إجراء صيانة أسهل للهياكل مقارنةً بأجهزة الستيلاريتور الأخرى، مما يجعله مناسباً بصورة خاصة للاستغلال التجاري. ومن شأن هذه الابتكارات أن تفضي إلى تشييد محطة قوى اندماج صغيرة الحجم يتراوح إنتاجها الكهربائي بين 50 ميغاواطاً (كهربائياً) و100 ميغاواط (كهربائي).■

محطة القوى الإيضاحية اليابانية JA-DEMO (الاتحاد الياباني Japanese Consortium، اليابان)

محطة JA-DEMO هي مفهوم محطة اندماج قائم على تصميم جهاز التوكاماك التقليدي، يجري تطويره في اليابان. وأهداف المحطة هي إنتاج الكهرباء بطريقة مستقرة وثابتة وتوفير ما يزيد على عدة مئات من الميغاواطات (الكهربائية)، وتحقيق الاكتفاء الذاتي من حيث التريتيوم، وضمان اللياقة التشغيلية للمحطة، وهو ما يتيح سد الثغرات للوصول إلى الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج. وتشمل المبادئ الأساسية لمحطة JA-DEMO إيضاح الجدوى التكنولوجية استناداً إلى تصميم مكونات مفاعل إيتير وضمان المرونة التشغيلية، بدءاً بعمليات التشغيل النبضي (نحو ساعتين) وانتهاءً بعمليات التشغيل في الحالة المستقرة. ومن المرتقب استكمال تشييد محطة JA-DEMO بحلول عام 2045، وثمة خطط لإيضاح عملية توليد الطاقة الكهربائية من خلال التشغيل النبضي بعد انتهاء أعمال التشييد بفترة قصيرة. والهدف من المرحلة الثانية هو ضمان التشغيل في حالة مستقرة بحلول عام 2055. وفيما يلي بعض من الخصائص المفاهيمية لمحطة JA-DEMO: قوى اندماج قدرها 1,5 غيغاواط، ونصف قطر رئيسي يبلغ 8,5 أمتار، ونصف قطر فرعي يبلغ 2,42 متر، وبلازما مطوَّلة K_{95}=1,65، وتيار بلازما شدته 12,3 ميغا أمبير، ومجال مغناطيسي على محور 5,94 تسلا، وبيتا معيرة β_N=3,4. وتبلغ قوة دفع التيار 83,7 ميغاواطاً، ويساوي المكسب العلمي المتوقع في الطاقة Q_{sci}=17,5.■

محطة القوى الإيضاحية الكورية K-DEMO (الاتحاد الكوري Korean Consortium، جمهورية كوريا)

محطة K-DEMO هي مفهوم محطة اندماج قائم على تصميم جهاز التوكاماك التقليدي، يجري تطويره في جمهورية كوريا. ويرتكز التصميم المفاهيمي لمحطة K-DEMO على نصف قطر رئيسي يبلغ 6,8 أمتار، ونصف قطر فرعي يبلغ 2,1 متر، ومجال حلقي تقارب شدته 7 تسلا (مع موصلات فائقة في درجات الحرارة المنخفضة)، وتيار بلازما تزيد شدته على 12 ميغا أمبير. ومن المتوقع استكمال التصميم الهندسي لمحطة K-DEMO بحلول عام 2035. وجرى التركيز في الآونة الأخيرة على مساحة التصميم التي تمت دراستها باستخدام موارد الحوسبة الفائقة للتحقق من البارامترات العامة. وإلى جانب المفهوم الأساسي، يُدرس أيضاً في الوقت الراهن خيار ثانٍ يشمل تصميماً أصغر حجماً وأكثر تقدماً يتضمن مغناطيسات فائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة.■

محطة القوى الإيضاحية الروسية DEMO-RF (اتحاد الشركات الروسي Russian Consortium، روسيا)

محطة DEMO-RF هي مفهوم محطة اندماج قائم على تصميم جهاز التوكاماك التقليدي، يطوِّره في روسيا اتحاد شركات وطني. ومن المتوقع استكمال تشييد محطة DEMO-RF بحلول عام 2055، والغرض هو إثبات إمكانية تحقيق مكسب صافٍ في الكهرباء في وقت لاحق. والعمل جارٍ حالياً لتطوير خصائص محطة DEMO-RF. ووفقاً للتصميم المفاهيمي الحالي، يُتوقَّع استخدام المرفق إما باعتباره محطة لطاقة الاندماج فحسب وإما باعتباره مفاعلاً هجيناً للاندماج والانشطار يشتمل على مغناطيسات فائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة، ومجال مغناطيسي تزيد شدته الإجمالية على 8 تسلا، وتيار بلازما تقارب شدته 5 ميغا أمبير. ويُنظر حالياً في إمكانية استخدام مكونات مواجهة للبلازما من الفلز السائل في الجدار الأول والمحرف. وفضلاً عن ذلك، تعتزم روسيا تطوير مفاعل هجين للاندماج والانشطار يُعرف باسم "مصدر نيوترونات الاندماج الإيضاحي" (DEMO Fusion Neutron Source). ولا يرمي هذا المفاعل إلى توليد الطاقة من الاندماج فحسب، بل يرمي أيضاً إلى استخدام النيوترونات الناتجة من الاندماج لتحويل اليورانيوم غير الانشطاري إلى مادة نووية انشطارية أو تحويل النفايات المشعة الطويلة العمر. ومفاعل DEMO Fusion Neutron Source المتوقع استكماله بحلول عام 2033 هو مكون رئيسي من مكونات استراتيجية المسار السريع التي تتَّبعها روسيا لتوليد طاقة الاندماج بحلول عام 2050.■

محطة الاندماج N4 (مجموعة Novatron Fusion Group، السويد)

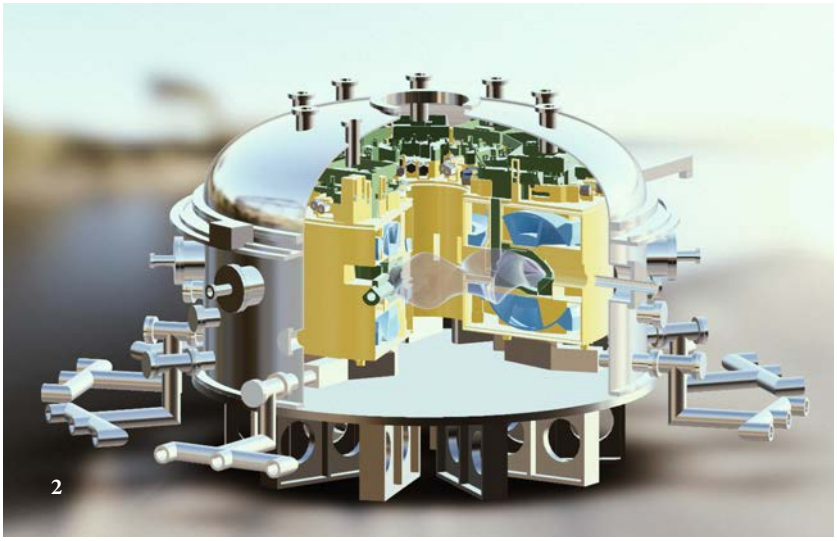
تعمل مجموعة Novatron Fusion Group على تطوير مفهوم لمحطة اندماج قائم على تصميم المرآة المغناطيسية التقليدي. وتشمل النقاط المدرجة في خارطة طريق الشركة تطوير جهازين تجريبيين (N1 وN2)، ومحطة إيضاحية سابقة للاستغلال التجاري (N3)، ومحطة الاندماج N4 الأولى من نوعها. وتحرز الشركة اليوم تقدماً في اختبار التحقق من المفهوم فيما يخص الجهاز N1، والهدف هو أن تكون لمحطة N4 قدرة على توليد الكهرباء تبلغ 1,5غيغاواط (كهربائي) بحلول نهاية ثلاثينيات هذا القرن. ومحطة N4 مصمَّمة لتُشغَّل في حالة مستقرة، على أن يكون الإمداد بالوقود وعملية الاستخراج المرتبطة بالغازات المُنصرفة متواصلين، مما يسمح بتحويل الجسيمات المؤينة إلى كهرباء بصورة مباشرة. وإضافةً إلى ذلك، يمكن تزويد محطة N4 بتكنولوجيا المغناطيسات الفائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة، وهو ما يتيح تعزيز أدائها وكفاءتها.■

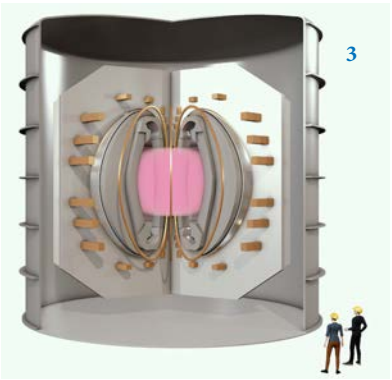
1 رسم لنموذج الجهاز المتضام الخاص بقوى الاندماج، المعروف باسم جهاز Tao (مهدى من شركة nT-Tao، إسرائيل).

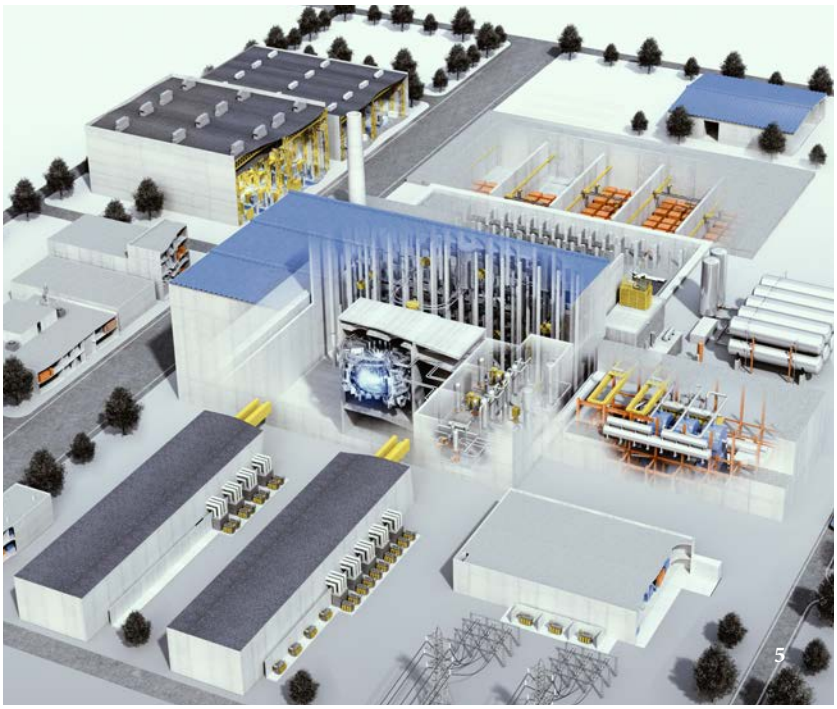
2 رسم لجهاز شركة Helical Fusion (مهدى من شركة Helical Fusion، اليابان).

محطة الاندماج التجريبية الخاصة بشركة Tokamak Energy (شركة Tokamak Energy، المملكة المتحدة)

الهدف من محطة الاندماج التجريبية التي تطوِّرها شركة Tokamak Energy هو دمج واختبار وإيضاح جميع النظم اللازمة للاستغلال التجاري لمحطات الاندماج في مرحلة لاحقة. وقد صُمِّمت المحطة باعتبارها جهاز توكاماك تكون فيه نسبة نصف القطر الرئيسي إلى نصف القطر الفرعي منخفضة. وتشمل المحطة مغناطيسات خاصة بالمجال الحلقي فائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة (أكسيد مختلط من عناصر الأتربة النادرة والباريوم والنحاس)، والغرض منها هو إيضاح نبضات البلازما المحترقة المستدامة والإنتاج الصافي من الطاقة. ويجري حالياً تصميم المشروع وتطويره في إطار عمل تعاوني بين أعضاء فريق دولي من الولايات المتحدة والمملكة المتحدة، وذلك في سياق برنامج تطوير الاندماج القائم على المعالم المرحلية البارزة والتابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة.■



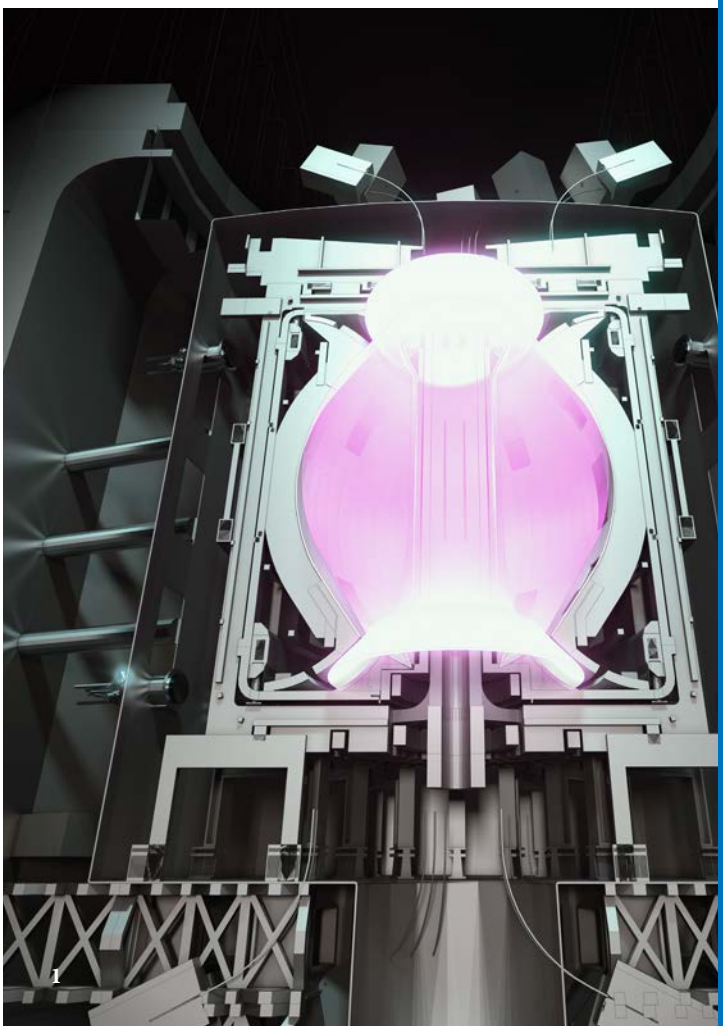


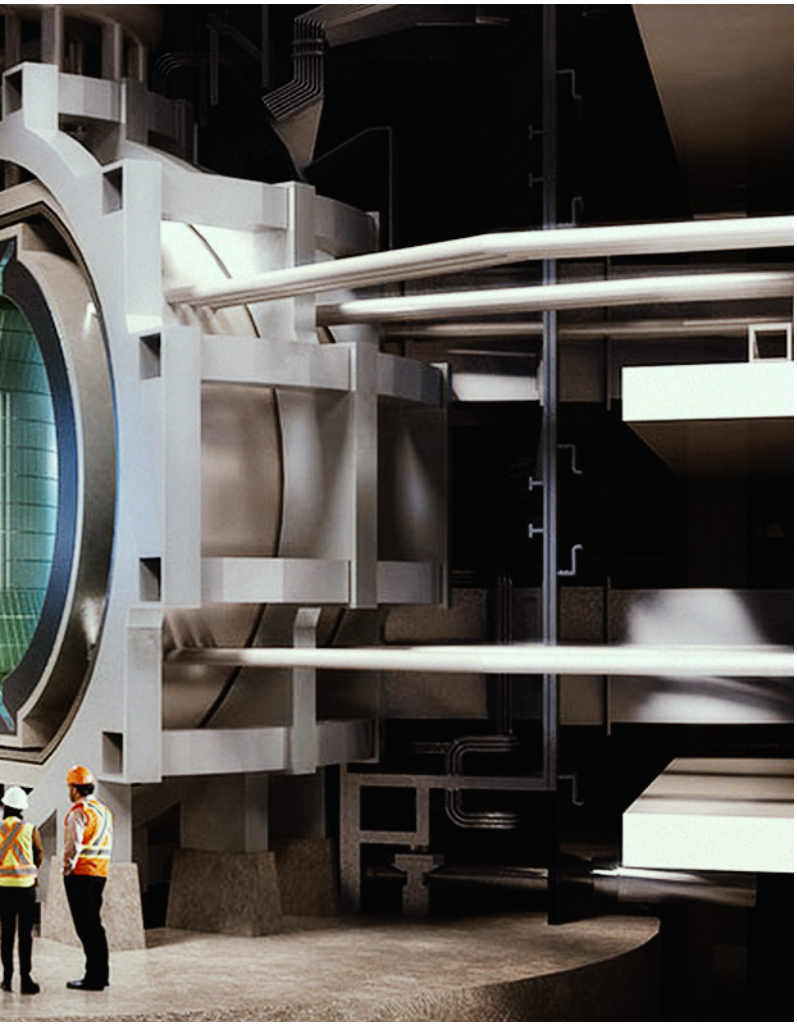


3 رسم للشكل المحتمل لمحطة الاندماج التجريبية الخاصة بشركة Tokamak Energy (مهدى من شركة Tokamak Energy، المملكة المتحدة).

4 مفهوم محطة الاندماج N4 الخاصة بشركة Novatron (الرسم مهدى من شركة Novatron، السويد).

5 مفهوم محطة القوى الإيضاحية اليابانية JA-DEMO (الرسم مهدى من المعاهد الوطنية لعلوم وتكنولوجيا الكم، اليابان).





محطة STEP (شركة UK Industrial Fusion Solutions، المملكة المتحدة)

الغرض من النموذج الأولي لمحطة الاندماج STEP هو إثبات إمكانية تحقيق مكسب صافٍ في الطاقة، وضمان الاكتفاء الذاتي من حيث الوقود، وإيضاح السبيل لتحقيق الاستغلال التجاري لقوى الاندماج، ويُرتقب البدء بالعمليات الأولى في عام 2040 [11]. واستخدم الفريق المعني بمحطة STEP منهجية للتصميم الرقمي مرتكزة على مرونة الخيارات التصميمية، خضعت لاستعراضات متنوعة تتعلق بمستوى نضج المفاهيم ولعدة تقييمات مستقلة أجراها عدد من الأفرقة الاستشارية التقنية. ويوفِّر التصميم المفاهيمي توازناً دقيقاً بين الأداء والتكلفة والحجم والمخاطر، ومن المرتقب أن يبدأ التصميم الهندسي المفصَّل في عام 2025. وستكون الشركة التابعة UK Industrial Fusion Solutions المملوكة بأكملها لمجموعة هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة (UKAEA Group) مسؤولة عن تسليم محطة STEP وستتولى قيادة تحالف بين القطاعين العام والخاص لتصميم وتشييد المحطة التي ستوجَد في موقع محطة قوى سابقة كانت تعمل بالفحم، في وست بورتون بشمال إنكلترا. وإضافةً إلى تشييد المحطة، تشمل مهمة مشروع STEP تطوير سلسلة إمداد رائدة عالمياً خاصة بالاندماج من أجل دعم الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج. وسيتيح المشروع إرساء بنية أساسية جديدة للموردين، بما يشمل الجهات المسؤولة عن ضمان تكامل النظم على نطاق المحطات ومصنِّعي النظم، وسيمكِّن ذلك من تصميم محطات الاندماج المستقبلية وتسليمها في شتى أنحاء العالم. ■

جهاز ARC (شركة Commonwealth Fusion Systems، الولايات المتحدة)

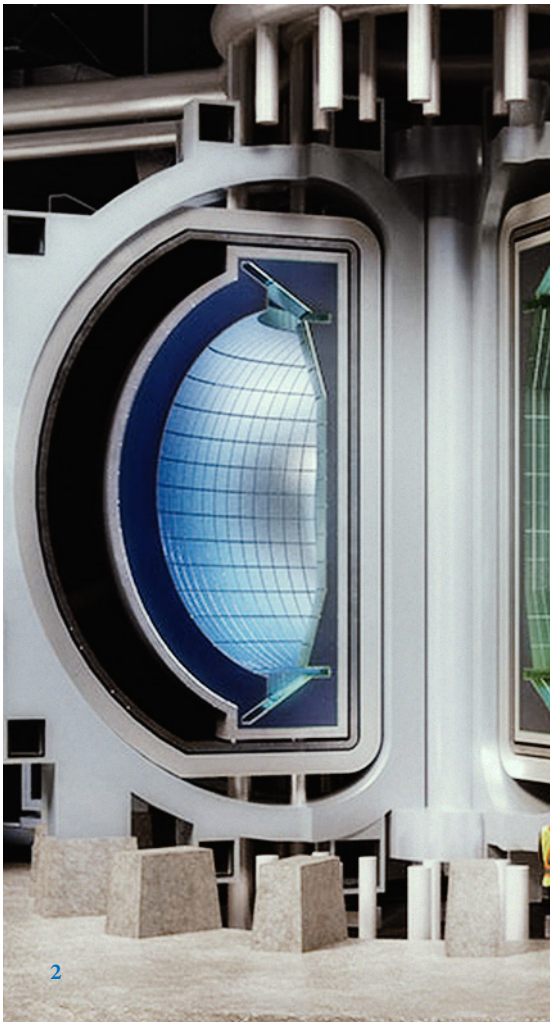
جهاز ARC هو مفهوم محطة اندماج قائم على تصميم جهاز التوكاماك التقليدي، تتولى تطويره شركة Commonwealth Fusion Systems (CFS). والهدف من جهاز ARC هو إثبات الجدوى التجارية لطاقة الاندماج عند استخدام تكنولوجيا المغناطيسات الفائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة. وسيكون جهاز ARC جهاز توكاماك تقليدياً صغير الحجم يشمل مغناطيسات فائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة بإمكانه توليد ما يقارب 400 ميغاواط (كهربائي)، وسيكون له نصف قطر رئيسي يناهز 4 أمتار، ونصف قطر فرعي يقارب 1,2 متر، ومجال مغناطيسي على المحور تبلغ شدته نحو 11 تسلا. وسيتضمن الجهاز ملفات مغناطيسية خاصة بالمجال الحلقي والمجال القطبي وملفات مغناطيسية لولبية مركزية لها ميزة التوصيل الفائق في درجات الحرارة المرتفعة. وستكون لبعض الملفات المغناطيسية مفاصل تتيح تفكيك العناصر لتغيير قطع الوعاء الفراغي بسرعة، وهو أمر يمكِّن من تقليل المشاكل المقترنة بدورة عمر الجدار الأول ويقدِّم فرصة لتغيير تصاميم الوعاء الفراغي ومواد المحرف في جهاز توكاماك واحد.

وسيستفيد جهاز ARC من المعلومات والدروس المستفادة المستمدة من جهاز التوكاماك SPARC الذي يجري تطويره حالياً (بدأت أعمال التشييد في شباط/فبراير 2023)، والذي يُتوقَّع أن يُستكمل بناؤه في عام 2025، وأن يدخل مرحلة

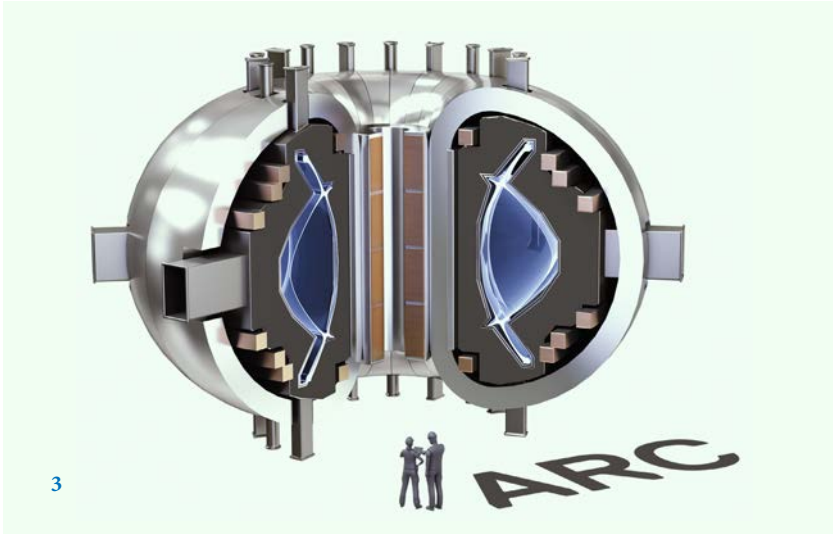
1 يُتوقَّع بدء العمليات الأولى الخاصة بمحطة STEP في عام 2040 (الصورة مهداة من هيئة UKAEA، المملكة المتحدة).

2 ستعتمد محطة GA FPP على مجموعة متقدمة من أجهزة الاستشعار وخوارزميات التحكم والحواسيب العالية الأداء (الصورة مهداة من شركة General Atomics، الولايات المتحدة).

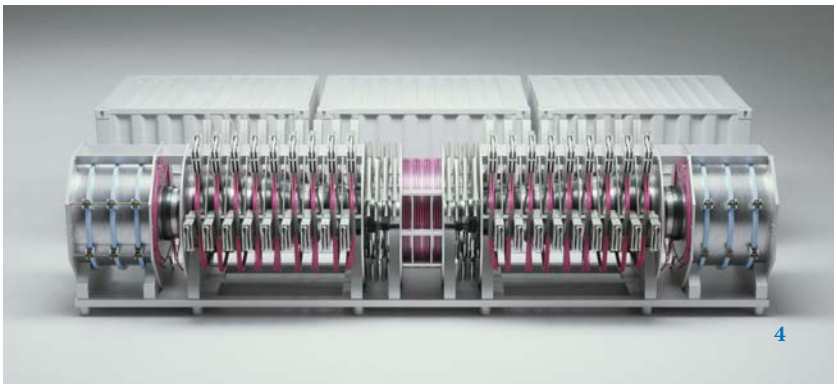
3 سيستخدم جهاز ARC تكنولوجيا المغناطيسات الفائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة (الصورة مهداة من شركة CFS، الولايات المتحدة).



2



3



4

التشغيل في عام 2026، وأن يحقِّق مكسباً علمياً صافياً في الطاقة. وسيُستكمل تشييد جهاز التوكاماك SPARC قريباً وقد سُلِّمت مكونات الجهاز وبدأ تجميعها هذه السنة. وأفادت شركة CFS بأن لديها من التمويل ما يقارب 2,1 مليار دولار أمريكي، فضلاً عن أكثر من 800 موظف يعملون حالياً بالدوام الكامل للمساعدة في تشييد جهاز SPARC، وتصنيع المغناطيسات الفائقة التوصيل في درجات الحرارة المرتفعة في مصنع المغناطيسات التابع للشركة، وأنشطة البحث والتطوير الخاصة بجهاز ARC.■

محطة GA FPP (شركة General Atomics، الولايات المتحدة)

محطة GA FPP هي مفهوم محطة اندماج قائم على تصميم جهاز توكاماك متقدم صغير الحجم ومستقر الحالة، تطوِّره شركة General Atomics. وسوف يستند النهج التصميمي إلى مجموعة متقدمة من أجهزة الاستشعار وخوارزميات التحكم والحواسيب العالية الأداء للتحكم في البلازما، وإلى دُثُر توليد مصنوعة من كربيد السليكون لإنتاج التريتيوم، وإلى موجات دقيقة لإنتاج الحرارة اللازمة للوصول إلى بلازما الاندماج.■

جهاز Polaris (شركة Helion Energy، الولايات المتحدة)

طوَّرت شركة Helion Energy ستة نماذج أولية لأجهزة اندماج، وهي تعمل حالياً على تطوير نموذجها السابع المسمى Polaris. ويمثِّل تطوير جهاز Polaris خطوة كبيرة مهمة في مجال الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج، والهدف هو أن يكون الجهاز الأول الذي سيتيح إنتاج الكهرباء من الاندماج. ويجري بناء جهاز Polaris في مرفق تبلغ مساحته نصف مساحة ملعب كرة قدم ويمكن اعتباره جهاز الاندماج السابق لمرحلة الإنتاج لدى شركة Helion Energy، مما يمهد الطريق لتشييد أول محطة اندماج تجارية. وصُمِّم جهاز Polaris، الذي يبلغ طوله الإجمالي 19 متراً، ليعمل مع أنواع الوقود التالية: الديوتيريوم-الديوتيريوم، والديوتيريوم-الهليوم-3، والديوتيريوم-التريتيوم.

وسيعمل الجهاز بمعدل تكرار يساوي 0,1 هرتز أو بسرعة أكبر، وسيشمل مجموعة من المكثفات تزيد قدرتها على 50 ميغاجول. وستتجاوز شدة المجال القصوى 15 تسلا، وهو ما يعادل نحو 1000 وحدة ضغط جوي. وسيتضمن جهاز Polaris ما مجموعه 3800 نظام للتشخيص وترشيح الغاز من أجل قياس أدائه وترشيح النواتج الصادرة عنه.■

4 الهدف من جهاز Polaris هو أن يكون الجهاز الأولللإنتاج الكهرباء من الاندماج (الصورة مهداة من شركة Helion، الولايات المتحدة).

1

2

محطة Longview (شركة Longview Fusion Energy Systems، الولايات المتحدة)

تهدف شركة Longview Fusion Energy Systems إلى تطوير محطة اندماج ترتكز على تصميم الاحتواء بالقصور الذاتي القائم على الليزر، وستُجرى عملية التصميم بالتعاون مع شركة Fluor Corporation. وستكون هذه المحطة نموذجاً للمحطات التجارية المستقبلية المزمع نشرها على المستويين الوطني والدولي.■

جهاز SX0 (شركة Stellarex، الولايات المتحدة)

تضطلع شركة Stellarex التي أُنشئت في عام 2022 بدور ريادي في تطوير محطة اندماج قائمة على تصميم الستيلاريتور. وتتعاون شركة Stellarex مع شركة Ontario Power Generation لتوليد الكهرباء ومع شركاء في قطاع الصناعة ومؤسسات أكاديمية من أجل إنشاء مركز امتياز معني باستخدام الستيلاريتور لإنتاج طاقة الاندماج في أونتاريو، بكندا. وهدف الشركة هو بناء جهاز الستيلاريتور SX0 الخاص بالاندماج، وتحقيق مكسب صافٍ في الطاقة خلال عام 2030، ثم استكمال تشييد محطة Stellarex لقوى الاندماج SX1، وهي محطة قادرة على إنتاج 600 ميغاواط (حراري) و250 ميغاواطاً (كهربائياً) من الطاقة الكهربائية.■

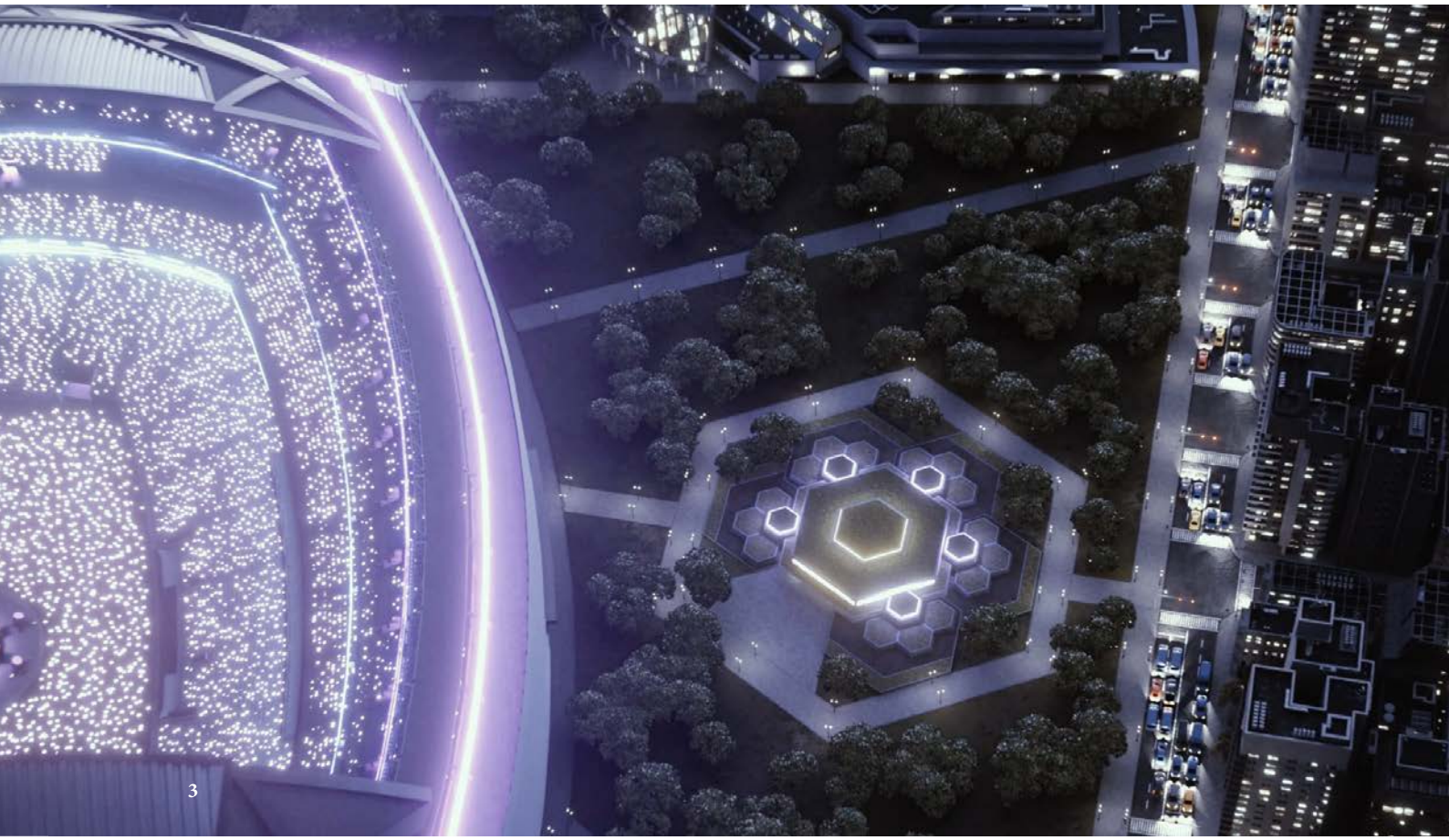
جهاز Da Vinci (شركة TAE Technologies، الولايات المتحدة)

شركة TAE Technologies ملتزمة منذ إنشائها بتحقيق الاندماج باستخدام الهيدروجين والبورون. فهذه التقنية مأمونة والعنصران اللازمان لها متوافران بكثرة لفترة تزيد على 100 000 سنة ويمكن الحصول عليهما في جميع أنحاء العالم. ولكنها تتطلب الحفاظ على درجات حرارة أعلى لإنتاج بلازما الاندماج المولِّدة للطاقة. ولبلوغ هذه المستويات من الأداء، طوَّرت شركة TAE Technologies منصة مسجلة الملكية تُعرف باسم نسق المجال المعكوس المتقدم المدفوع بالحزم. ويجمع هذا النهج بين أعمق المعارف في مجال فيزياء البلازما وفيزياء المعجلات لتسخين البلازما وجعلها مستقرة. وفضلاً عن ذلك، يتيح هذا النسق الخطي المتضام إيجاد جهاز أصغر حجماً ومن ثمَّ أكثر قابليةً للتغيير من حيث الحجم وأكثر فعاليةً من حيث التكلفة. ومن المتوقع أن يكون جهاز الجيل السابع الخاص بشركة TAE Technologies، والمعروف باسم Da Vinci، أول نموذج في العالم لمحطة تولِّد الطاقة من اندماج الهيدروجين والبورون وتزوِّد الشبكة الكهربائية بالطاقة في مطلع ثلاثينيات هذا القرن. ■

1 من المتوقع أن يكون جهاز الجيل السابع الخاص بشركة TAE Technologies، والمعروف باسم Da Vinci، أول نموذج في العالم لمحطة تولِّد الطاقة من اندماج الهيدروجينوالبورون (الصورة مهداة من شركة TAE Technologies الولايات المتحدة).

2 سترتكز محطة Longview على تصميم الاحتواء بالقصور الذاتي القائم على الليزر (الصورة مهداة من شركة Longview Fusion Energy Systems، الولايات المتحدة).

3 تصميم الاحتواء زيتا الذي يُستخدم فيه تدفق طبقي للبلازما لجعلها مستقرة في محطة Zap (الصورة مهداة من شركة Zap Energy، الولايات المتحدة).



3

محطة Zap (شركة Zap Energy، الولايات المتحدة)

تطوِّر شركة Zap Energy محطة اندماج يقوم تصميمها على جهاز احتواء زيتا يُستخدم فيه تدفق طبقي للبلازما لجعلها مستقرة. وتتيح هذه التكنولوجيا احتواء البلازما وضغطها بدون استخدام ملفات مغناطيسية فائقة التوصيل ولا ليزرات قوية، وهو ما يسمح بإجراء عمليات تكرارية سريعة للوصول إلى مصدر تجاري لطاقة الاندماج. وداخل جهاز اندماج عامل، تبدأ كل عملية من عمليات الاحتواء زيتا بنبضة كهربائية قوية تنتج من مجموعة من المكثفات. وتؤدي هذه النبضة إلى تحوُّل سحابة من غاز الديوتيريوم إلى حلقة مسطحة من البلازما الساخنة. ويتحرك القرص بسرعة إلى أسفل الكاثود الداخلي للجهاز أو الطرف السالب الشحنة. وبعد عبور المخروط الأمامي للكاثود، يصبح قرص البلازما عموداً ضيقاً تتدفق فيه البلازما على طبقات مختلفة وبسرعات مختلفة. ويُشار إلى أن جدران الفلز السائل المتدفق القادرة على تحمُّل ظروف قصوى تلتقط الطاقة من بلازما الاندماج. ويؤدي مزيج من الرصاص والليثيوم في الجدران إلى إنتاج التريتيوم الذي يُعاد استخدامه في المحطة كوقود. وما يعنيه هذا التصميم الصغير الحجم هو أن جهاز اندماج واحداً لا يتعدى عرضه 3 أمتار يمكن أن ينتج نحو 50 ميغاواطاً (كهربائياً) — وهو ما يكفي لإمداد مدينة صغيرة بالكهرباء — ويُحتمل أن تشتمل كل محطة من محطات القوى الخاصة بشركة Zap Energy على عدة وحدات.■

دور طاقة الاندماج في نظام كهرباء خالٍ من الكربون

قد يعود الاندماج بالفائدة على المجتمع بما يساوي تريليونات الدولارات الأمريكية في عالم خالٍ من الكربون. ويعتمد نطاق وتوقيت نشر محطات الاندماج وتشغيلها اعتماداً كبيراً على ما يلي:

- تكاليف الاندماج (تشمل العوامل الرئيسية المؤثرة في التكلفة في محطات الاندماج تكاليف المعدات، والاعتبارات المتعلقة بالرقابة، وتكاليف التشغيل والصيانة)؛
- تكلفة ومدى توافر تكنولوجيات بديلة منخفضة الكربون في كل منطقة؛
- القيود على انبعاثات الكربون؛
- النمو الاقتصادي ونمو الطلب على الكهرباء؛
- هيكل السوق.

وتتطلب إمكانية التوسع في إنتاج طاقة الاندماج تطوير المواد المناسبة وتوافر القدرات اللازمة لتصنيع مكونات محددة، وليست الحال على هذا النحو فيما يتعلق بالمواد الخام [12].■

دور طاقة الاندماج في نظام خالٍ من الكربون

السياق والسيناريو

وهات

تسليط الضوء على
جهود القطاعين العام
والخاص في برامج تطوير
طاقة الاندماج.

شهدت الاستثمارات الخاصة في شركات الاندماج ارتفاعاً كبيراً

تتماشى هذه الجهود مع الهدف المتوخى تحقيقه على الصعيد العالمي وهو الانتقال إلى مصادر الطاقة المستدامة ونشر محطات الاندماج باعتبارها حلاً للحصول على طاقة مأمونة ونظيفة ووفيرة في شتى أنحاء العالم.

منشور "العناصر الأساسية للاندماج" الصادر عن الوكالة

يستلزم هذا الارتفاع بذل جهود على المستوى العالمي لتسريع وتيرة التقدم العلمي والتكنولوجي وبناء سلاسل إمداد ووضع أطر رقابية.

وتقرُّ الحكومات في شتى أنحاء العالم بالإمكانات التي توفِّرها طاقة الاندماج وتقوم باستثمارات كبيرة في أنشطة البحث والتطوير لدفع عجلة التقدم. والعمل جارٍ لإعداد استراتيجيات وطنية — ويترافق ذلك مع تخصيص الكثير من الأموال — لدعم مبادرات القطاعين العام والخاص على حد سواء، ووضع أطر رقابية أولية، وزيادة التواصل مع شركات سلاسل الإمداد. وتزداد أيضاً الجهود التعاونية، بحيث تبرم البلدان اتفاقات لتقاسم المعارف والموارد والبنى الأساسية من أجل تسريع وتيرة التقدم نحو إنتاج طاقة الاندماج على نطاق تجاري. ويوجِد التآزر بين الإنجازات العلمية وأطر السياسات الداعِمة نظاماً مترابطاً ومتيناً يرمي إلى جعل طاقة الاندماج حقيقة واقعة في المستقبل القريب.

ويزداد اهتمام مجموعة واسعة من الجهات المعنية بطاقة الاندماج. وشهد قطاع الصناعة إبرام عدد من الاتفاقات بين مطوِّري تكنولوجيا الاندماج ومجموعة متنوعة من المستخدمين النهائيين الساعين إلى الانتفاع بمصدر للطاقة النظيفة والموثوق بها في المستقبل. ويشمل المستخدمون النهائيون شركات معنية بمجال التكنولوجيا مثل أمازون وغوغل ومايكروسوفت التي يرتفع طلبها على الطاقة ارتفاعاً شديداً نتيجةً لتقدُّم نظمها الخاصة بالذكاء الاصطناعي، فضلاً عن الشركات المنتجة للطاقة بالوقود الأحفوري، والمرافق العامة، وشركات سلاسل الإمداد، والشركات المنتجة للمركبات الكهربائية وحتى الشركات الناشئة التي تطوِّر تكنولوجيا التقاط ثاني أكسيد الكربون من الهواء مباشرةً لإزالته من الغلاف الجوي في إطار مساعي الوصول بصافي انبعاثات الكربون إلى مستوى الصفر. ■

تنسيق جهود القطاعين العام والخاص لوضع برنامج خاص بتطوير طاقة الاندماج يقوده قطاع الصناعة

يمكن أن يكون الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج على نطاق واسع جزءاً من الحل لمواجهة التحديات المناخية والاقتصادية والتحديات المقترنة بأمن الطاقة في المستقبل. ونظراً إلى أن طاقة الاندماج لا تؤدي إلى انبعاث ثاني أكسيد الكربون أو غيره من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي، فإن هذا المصدر المحتمل للطاقة النظيفة يجتذب اهتماماً كبيراً في الأسواق فضلاً عن استثمارات صناعية كبيرة تأتي جزئياً من شراكات قائمة بين القطاعين العام والخاص [13].

وأفضت التطورات والتقدم الكبير في علوم وتكنولوجيا الاندماج في السنوات الأخيرة إلى تحفيز القطاع الخاص على المساهمة في تطوير طاقة الاندماج في وقت يتواصل فيه الارتفاع السريع في استثمارات القطاعين العام والخاص واستثمارات رؤوس الأموال في مشاريع الاندماج [14، 15]. وتسعى شركات عديدة إلى التوصل إلى تطبيقات تجارية للاندماج في السنوات أو العقود القليلة المقبلة.

وفي ضوء المتطلبات المالية والتقنية الكبيرة المقترنة بتطوير محطات اندماج تتسم بمقومات البقاء، فإن الشراكات بين القطاعين العام والخاص تُعتبر بصورة متزايدة آلية بالغة الأهمية في تطوير طاقة الاندماج. ويحتاج القطاع العام نظراً إلى حجم الموارد المتوافرة لديه إلى مساهمة مستثمرين من القطاع الخاص يمكنهم توفير رؤوس أموال إضافية وخبرات متخصصة. وتبرِز استثمارات القطاع الخاص الهائلة في تكنولوجيات الاندماج، التي باتت تتجاوز 7,3 مليارات دولار أمريكي على الصعيد العالمي [15]، اهتمام المستثمرين في تطوير محطات اندماج تتسم بمقومات البقاء في السنوات القادمة. وتحتاج مشاريع القطاع الخاص إلى دعم حكومي يتيح طمأنة المستثمرين والاستفادة من الخبرات المكتسبة في القطاع العام على مدى سنوات من أنشطة البحث والتطوير. بيد أن الموارد لا تزال محدودة وثمة حاجة ماسة إلى تخصيص الموارد بكفاءة. ومن شأن الشراكات بين القطاعين العام والخاص أن تساعد على التخفيف من هذا التحدي عن طريق ضمان تقاسم هذين القطاعين المخاطر والمكاسب على حد سواء. ويمكن للتمويل والدعم الحكوميين أن يوفِّرا الاستقرار والثقة اللازمين لمستثمري القطاع الخاص، مما يمكِّن شركات الاندماج من تنفيذ مشاريع طموحة مع تنويع المخاطر المالية التي قد تواجهها [16].■

ويتيح التعاون بين المؤسسات العامة والشركات الخاصة اتِّباع نهج أكثر تنوعاً فيما يخص البحث والتطوير، وهو ما يعزِّز الابتكار ويسرِّع وتيرة التقدم عن طريق المضي قدماً جنباً إلى جنب في تنفيذ الأنشطة، على أساس جداول زمنية أقصر [17]. وفي العادة، تقوم الشراكات بين القطاعين العام والخاص على تشارك القطاع الخاص والحكومات في تحمُّل المسؤوليات المقترنة بالمشاريع. ففي حين توفِّر الحكومات في غالبية الأحيان تدفقات نقدية مضمونة، يدير القطاع الخاص عملية تطوير المشاريع، الأمر الذي يفضي إلى تقاسم المخاطر.

وعندما تُدار الشراكات بين القطاعين العام والخاص بطريقة مدروسة، قد تكون أدوات قيِّمة في معالجة التحديات الطويلة الأجل المرتبطة برؤوس الأموال والاستقرار السياسي [18]. وسبق أن نجح قطاع الطاقة في الاستفادة من مزايا الشراكات بين القطاعين العام والخاص، ومن شأن هذه الشراكات أن تقدِّم وسيلة للمساعدة على التخفيف من حدة تغير المناخ [19، 20]. وفضلاً عن ذلك، تتوافر فعلاً في الوقت الحالي أطر للشراكات بين القطاعين العام والخاص، إذ استُخدمت أطر كهذه على نطاق واسع في قطاعات أخرى لسنوات عديدة [21].

ولا يرتكز تشييد محطات الاندماج على نهج واحد مناسب للجميع. ولذا، من المنطقي أن تكون الشراكات بين القطاعين العام والخاص مرنة بطبيعتها، لأن ذلك يمكِّن الحكومات والمستثمرين من تكييف المبادرات مع الظروف الخاصة ببلد أو منطقة ما، أو بمشروع محدد في بعض الحالات.■

التمويل المبلغ عنه في الفترة 2024/2023

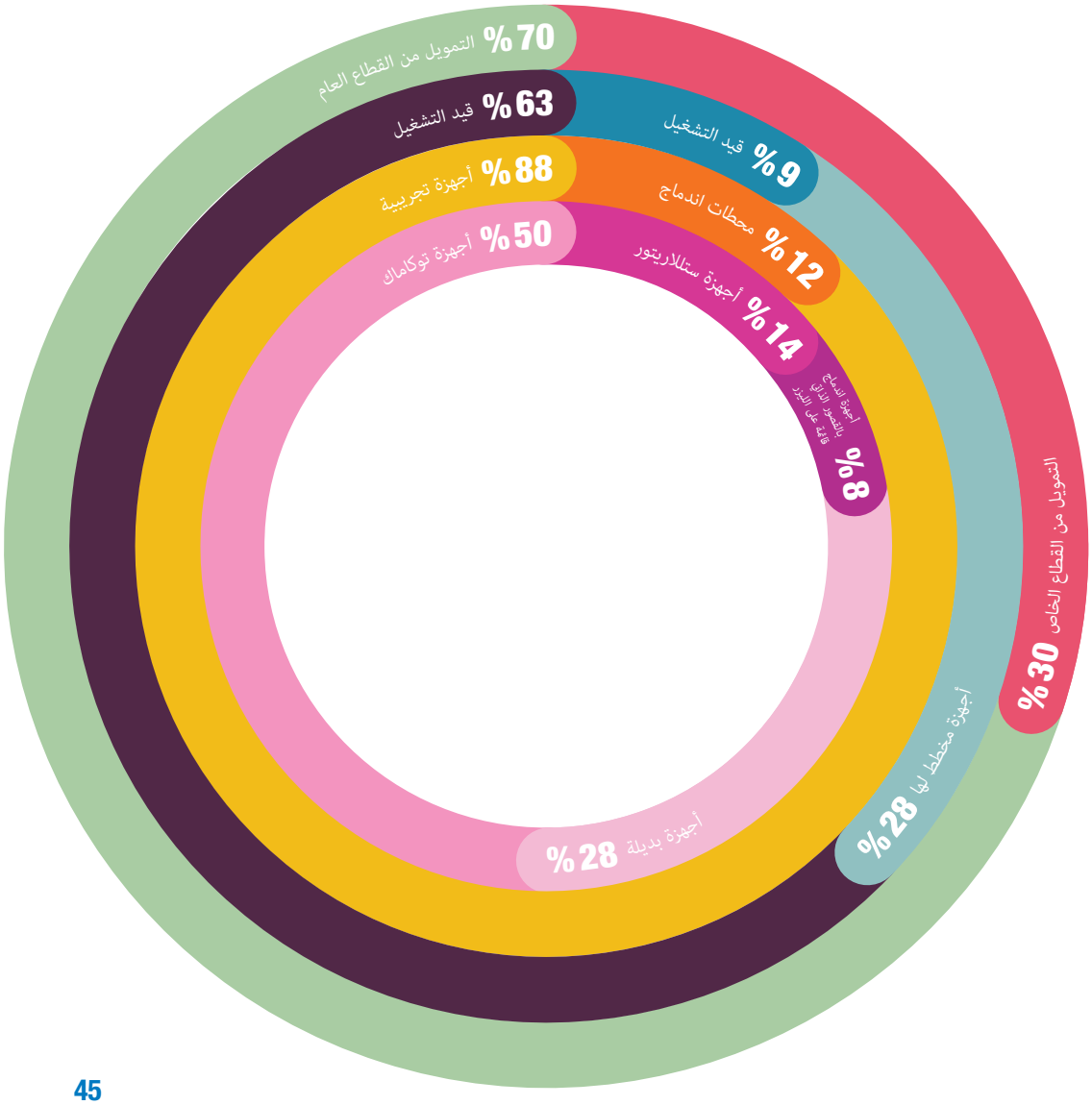
الدولة العضو	التمويل (بمليارات الدولارات الأمريكية)	الإطار الزمني
ألمانيا	1,4 تقريباً	على مدى فترة 5 سنوات
جمهورية كوريا	0,9 تقريباً	على مدى فترة 10 سنوات
المملكة المتحدة	0,8 تقريباً	على مدى فترة 5 سنوات
الولايات المتحدة	1,5[i] تقريباً	سنوياً

[i] يشمل ذلك 690 مليون دولار أمريكي من إدارة الأمن النووي الوطنية التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية بغية دعم الاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي لأغراض مهام إدارة الأمن النووي الوطنية، لا لأغراض تطوير طاقة الاندماج.

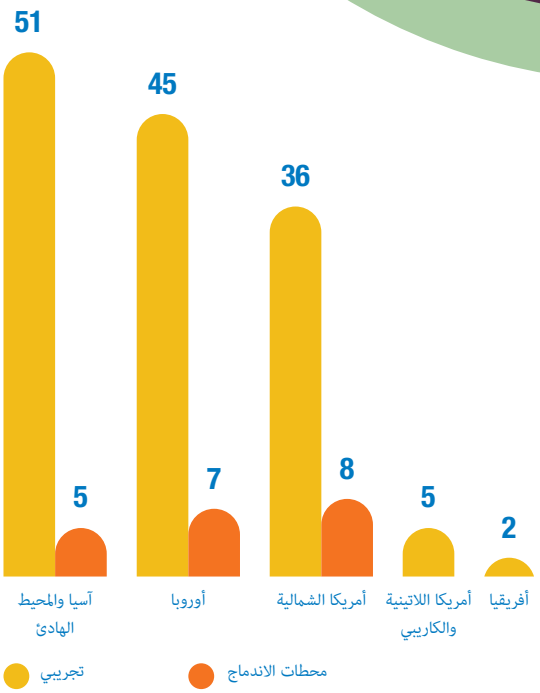
البرامج الرئيسية التي تُنفَّذ فيها نماذج لتطوير الاندماج بقيادة قطاع الصناعة

تُنفِّذ بعض من أكبر الجهات الفاعلة المعنية بالاندماج في العالم نماذجها الخاصة لإشراك قطاع الصناعة والتقدم في تطوير طاقة الاندماج

- الاتحاد المعني بالاندماج في الصين: يضم معاهد بحثية وشركات رئيسية تملكها الحكومة، بما يشمل بعضاً من أكبر شركات الطاقة والفولاذ في البلد.
- مبادرة التمويل في ألمانيا: تشارك فيها شركات وجامعات ومؤسسات بحثية لتشييد محطة لقوى الاندماج في ألمانيا بحلول عام 2040.
- الاتحاد المعني بمرفق DTT في إيطاليا: يضم عدداً كبيراً من المؤسسات البحثية الإيطالية، فضلاً عن شركاء حكوميين وإقليميين وجهات معنية دولية.
- برنامج Moonshot للبحث والتطوير في اليابان: يشجع مشاركة المنظمات والجامعات والشركات الخاصة لضمان اتِّباع نُهج متعددة في مجال طاقة الاندماج.
- المبادرة الجديدة لجمهورية كوريا: ترمي إلى إحراز التقدم في تطوير تكنولوجيا محطات الاندماج من خلال شراكة بين القطاعين العام والخاص وإلى إرساء نظام صناعي مترابط لطاقة الاندماج يقوده القطاع الخاص.
- برنامج آفاق الاندماج في المملكة المتحدة: يرمي إلى تشجيع الابتكار وتعزيز قدرات قطاع الصناعة بوجه عام من خلال التعاون الدولي وتطوير محطات قوى الاندماج المستقبلية وتوفير تمويل إضافي لإرساء البنى الأساسية اللازمة لشركات القطاع الخاص المعنية بطاقة الاندماج.
- برنامج تطوير الاندماج القائم على المعالم المرحلية البارزة وإطار اتحاد الشراكة بين القطاعين العام والخاص في الولايات المتحدة: الهدف هو دعم الشركات عن طريق توفير التمويل استناداً إلى المعالم المرحلية البارزة المحددة مسبقاً بشأن الاستغلال التجاري، وهي معالم مرحلية ينبغي بلوغها والتحقق منها. وبدأت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة أيضاً بجمع المعلومات عن اقتراح إنشاء اتحاد في مجال طاقة الاندماج مشترك بين القطاعين العام والخاص.■



مجموعة أجهزة الاندماج وحالتها التشغيلية وتمويلها في عام 2024 [22].



عدد أجهزة الاندماج التي هي قيد التشغيل أو قيد التشييد أو التي يجري التخطيط لها حسب المناطق.

نظام المعلومات عن أجهزة الاندماج

العوامل المساعِدة الرئيسية في المسار المؤدي إلى نظام مترابط لطاقة الاندماج يقوده قطاع الصناعة

تحتاج الشركات المعنية بالاندماج إلى الحصول على القدر ذاته من الدعم في إطار الاقتصاد السياسي لسوق الطاقة كي تتمكن من دفع عجلة الاستغلال التجاري وتوسيع نطاق أعمالها بفعالية. وتستفيد الشركات المعنية بمصادر الطاقة الأخرى المستغلة تجارياً من شراكات حكومية وتشريعات ثابتة وحوافز ضريبية استراتيجية وضِعت لضمان الصالح العام [23]. ومن شأن توفير القدر ذاته من الدعم لتطوير طاقة الاندماج أن يوجِد مساراً شاملاً للاستغلال التجاري لطاقة الاندماج. ومن خلال وضع سياسات داعِمة، يمكن للحكومات أن تسرِّع الخطوات المتخذة لإدخال طاقة الاندماج النظيفة والوفيرة والآمنة والمتسمة بالكفاءة إلى السوق.

وفي الولايات المتحدة على سبيل المثال، أفضت السياسات الضريبية إلى التشجيع على تطوير تكنولوجيات متنوعة خاصة بالطاقة النظيفة. وبموجب قانون الحد من التضخم الصادر في عام 2022، تم توفير الكثير من الإعفاءات الضريبية لقطاع طاقة الاندماج [24] واعتباراً من عام 2025، ستُتاح إعفاءات ضريبية جديدة "محايدة تكنولوجياً" [25]، وستكون المرافق المختصة بالإنتاج التجاري لطاقة الاندماج مؤهلة للانتفاع بها. وفي المملكة المتحدة، بدأت الحكومة بتعديل اللوائح لتصنيف محطات قوى الاندماج في فئة مشاريع البنى الأساسية التي تتسم بأهمية وطنية في إنكلترا وويلز. وسيسرِّع هذا التغيير عملية معالجة طلبات التخطيط من خلال التركيز على مسائل محلية محدَّدة بدلاً من التركيز على الحاجة إلى التكنولوجيا [26]. وفي الاتحاد الأوروبي أيضاً، صُنِّف الاندماج في القانون الصناعي الرامي إلى بلوغ صافي انبعاثات صفري باعتباره "تكنولوجيا استراتيجية" [27].

وإضافةً إلى الحوافز الضريبية، وضعَت الحكومات برامج لدعم تكنولوجيات الطاقة النظيفة، ومنها معايير حافظات مصادر الطاقة المتجددة ومتطلبات اعتماد تكنولوجيا احتجاز الكربون. ويمكن أن تصبح طاقة الاندماج بعد البدء بإنتاجها، نتيجةً للمزايا التي توفِّرها على صعيد الحد من الانبعاثات وغير ذلك من الفوائد، جزءاً من تعاريف الطاقة 'النظيفة' أو 'العديمة الانبعاثات'. وتُعَدُّ سلاسل الإمداد القادرة على الصمود، والأطر الرقابية الفعالة، والاستثمارات المستقرة الطويلة الأجل، عوامل أساسية في نشر طاقة الاندماج على نطاق واسع بنجاح. ويتطلب بناء صناعة قوية في مجال طاقة الاندماج وجود تعاون بين الحكومات ومؤسسات البحث والتطوير والشركات الخاصة.■

الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج

من أجل تعزيز التعاون على نطاق قطاع الاندماج، أعلنت الوكالة إنشاء الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج WFEG [28]. ويرمي هذا الفريق إلى الجمع بين العلماء والمهندسين وواضعي السياسات والخبراء الماليين والرقابيين وممثلي الشركات الخاصة لتسريع وتيرة التقدم نحو الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج [13]. وللتعاون والتنسيق الدوليين دور حيوي في نشر طاقة الاندماج على نطاق تجاري. ويهدف الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج إلى الجمع بين ممثلي القطاعين العام والخاص والصناعة والأوساط الأكاديمية والمجتمع المدني لتشكيل مجتمع عالمي متماسك يُعنى بطاقة الاندماج. وعن طريق التشجيع على اتِّباع نهج موحد قائم على التعاون، يسعى الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج إلى تعجيل الانتقال، في مجال طاقة الاندماج، من مراحل التطوير إلى الجدوى التجارية، بما يضمن جعل الاندماج أساس مستقبل الطاقة النظيفة في العالم.

وسيكون هذا الفريق بمثابة حافز في هذه المرحلة المفصلية حيث تُعَدُّ الجهود الموحدة عاملاً أساسياً للتقدم سريعاً في تطوير طاقة الاندماج من خلال التركيز على ما يلي:

- تعزيز التعاون العالمي، وبخاصة عن طريق التنسيق وتوفير الحيز اللازم وفرص متجددة لإجراء حوار تفاعلي وللتبادل والتخطيط وإقامة الشراكات بين الجهات المعنية من قطاع الصناعة والحكومات والأوساط الأكاديمية والهيئات الرقابية والجمهور العام؛
- المساعدة على ضمان كفاءة برامج البحث والتطوير الخاصة بطاقة الاندماج، بما يشمل استخدام المرافق القائمة والتخطيط لمرافق جديدة؛
- العمل بصورة جماعية لتحديد الثغرات القائمة على صعيدَي التكنولوجيا والهندسة ووضع استراتيجيات للتوصل إلى حلول على المستوى الدولي؛
- التشجيع على مناقشة سبل وضع أطر رقابية فعالة في مجال الاندماج؛
- إشراك الجمهور على نطاق أوسع، ورفع مستوى مشاركة الشباب، وزيادة المساواة بين الجنسين في ميدان طاقة الاندماج؛
- الترويج لإدخال الاندماج إلى سوق الطاقة؛
- تيسير إدراج الاندماج في نظم الطاقة القائمة، بما يشمل البنى الأساسية الداعِمة.■

سيشارك المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، ورئيسة الوزراء الإيطالية، السيدة جورجيا ميلوني، في ترؤس الاجتماع الوزاري الافتتاحي للفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج (الصورة مهداة من حكومة إيطاليا).

ستعمل الوكالة بهمَّة على دعم تعزيز الالتزامات المقدمة في إطار الفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج. وسوف تعمد الوكالة، بالتعاون مع الدول الأعضاء فيها وشركاء آخرين، إلى تنظيم اجتماعات دورية للفريق بغية استعراض التقدم المحرز في تحقيق النتائج المتوخاة، وضمان توافر مستوى عالٍ من المشاركة السياسية، والتشجيع على النهوض بالعمل التعاوني في مجال طاقة الاندماج. ومن خلال هذه الجهود، ترمي الوكالة إلى المساعدة على إحراز تقدُّم متواصل وإلى تيسير التعاون في الخطوات المتخذة عالمياً لتطوير طاقة الاندماج.

الاجتماع الوزاري الأول للفريق العالمي المعني بطاقة الاندماج

مسارات طاقة الاندماج

لمحة عامة عن الاستراتيجيات الوطنية، والاتفاقات الدولية، والاستثمارات الخاصة، واستثمارات رؤوس الأموال، والعمليات الرقابية التي تتلاقى لتعزيز التقدم نحو الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج.

1

الاستراتيجيات الوطنية والاتفاقات الدولية

خلال مؤتمر الوكالة التاسع والعشرين للطاقة الاندماجية، كشفت المملكة المتحدة عن استراتيجيتها الخاصة بطاقة الاندماج [29] وعَرضت "برنامج آفاق الاندماج" الجديد. وفي إطار هذه المبادرة، سيُستثمر مبلغ إضافي قدره 650 مليون جنيه استرليني (793 مليون دولار أمريكي) على مدى خمس سنوات بهدف تمويل مجموعة من برامج البحث والتطوير. ويشتمل هذا الاستثمار على إنشاء 2200 مكان للتدريب، وبناء مرفق جديد خاص باختبارات دورة الوقود، وتوفير التمويل لإرساء البنى الأساسية للشركات الخاصة المعنية بطاقة الاندماج، ولا سيما في حرم مركز كالهام التابع لهيئة UKAEA في المملكة المتحدة. وجاء هذا الإعلان في أعقاب قرار المملكة المتحدة الانسحاب من برنامج البحث والتدريب الخاص بالجماعة الأوروبية للطاقة الذرية (اليوراتوم).

وفي وقت لاحق من عام 2024، أعلنت الحكومة البريطانية تنظيم مسابقة خاصة بقطاع الصناعة [30] من أجل تحديد شركاء في مجالَي الهندسة والتشييد لتنفيذ النموذج الأولي لمحطة طاقة الاندماج في المملكة المتحدة، المعروفة باسم STEP. وتهدف المسابقة إلى إقامة تحالف بين القطاعين العام والخاص بقيادة شركة UK Industrial Fusion Solutions التابعة لهيئة UKAEA، وذلك من أجل تسليم النموذج الأولي لمحطة STEP. ويسعى المشروع، الذي يجري تنفيذه في شمال إنكلترا، إلى إثبات إمكانية تحقيق مكسب صافٍ في الطاقة من الاندماج بحلول أربعينيات هذا القرن، ومن المتوقع أن تُمنح عقود لشركاء في مجالَي الهندسة والتشييد بحلول أواخر عام 2025 أو أوائل عام 2026.

وأعلنت الحكومة البريطانية أيضاً وضع خطط تهدف إلى تبسيط عملية التخطيط لمحطات الاندماج المستقبلية. وبدأت وزارة أمن الطاقة وصافي الانبعاثات الصفري في المملكة المتحدة بتعديل اللوائح لتصنيف محطات قوى الاندماج في فئة مشاريع البنى الأساسية التي تتسم بأهمية وطنية في إنكلترا وويلز. وسيسرِّع هذا التغيير عملية معالجة طلبات التخطيط من خلال التركيز على مسائل محلية محدَّدة بدلاً من التركيز على الحاجة إلى التكنولوجيا. وستتيح عملية تشاورية [26] جمع الآراء والتعليقات بشأن بيان السياسة الوطنية قبل عرضه على البرلمان للموافقة عليه.

وإضافةً إلى ذلك، أعلنت وزارة أمن الطاقة وصافي الانبعاثات الصفري في المملكة المتحدة ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة إقامة شراكة استراتيجية

استراتيجية المملكة المتحدة لعام 2023 بشأن طاقة الاندماج

استراتيجية الولايات المتحدة لعام 2024 بشأن طاقة الاندماج

جديدة [31] تهدف إلى تعجيل عملية إيضاح طاقة الاندماج وإضفاء الطابع التجاري عليها، مع التركيز على النهوض باستراتيجيتيهما الوطنيتين في مجال طاقة الاندماج. وفي أعقاب ذلك، أصدر البيت الأبيض خلال الدورة الثامنة والعشرين لمؤتمر الأمم المتحدة المعني بتغير المناخ (مؤتمر COP28) استراتيجية لإقامة "شراكات دولية في حقبة جديدة لتطوير طاقة الاندماج" [32]. ويشير ذلك إلى توسيع الإدارة الأمريكية رؤيتها لتسريع عملية إيضاح طاقة الاندماج وإضفاء الطابع التجاري عليها، وهي رؤية عززتها شراكة أخرى بين الولايات المتحدة واليابان، تم إعلانها في نيسان/أبريل 2024 [33].■

وأعلنت وزارة الطاقة الأمريكية استراتيجيتها الخاصة بطاقة الاندماج لعام 2024 [34] التي تهدف إلى تحقيق ما يلي: '1' سد الثغرات العلمية والتكنولوجية القائمة لتشييد محطة اندماج تجريبية ذات أهمية تجارية؛ و'2' تمهيد الطريق لنشر طاقة الاندماج بصورة مستدامة ومنصفة على نطاق تجاري؛ و'3' إقامة شراكات خارجية والاستفادة منها. وفي خطوة منسقة تنسيقاً وثيقاً مع هذه الاستراتيجية، أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية أيضاً أنها تعتزم توفير 180 مليون دولار أمريكي لمبادرة الأفرقة التعاونية المعنية بدفع عجلة البحوث والابتكارات في مجال الاندماج (Fusion Innovative Research Engine Collaboratives)، وطرحت رؤية جديدة لبرنامجها الخاص بعلوم طاقة الاندماج معنونة "مد الجسور" (Building Bridges). وتركز هذه الرؤية على العمل بهمَّة لسد الثغرات العلمية والتكنولوجية وتشييد محطة اندماج تجريبية ذات أهمية تجارية، وهي تدعم في الوقت نفسه البحوث التأسيسية المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيات التمكينية في مجال طاقة الاندماج.

1 حفل افتتاح مؤتمر الوكالة التاسع والعشرين للطاقة الاندماجية في لندن. من اليسار: وكيل وزير الدولة البرلماني لشؤون الطاقة النووية والشبكات في المملكة المتحدة، السيد أندرو بووي؛ والمدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي؛ والرئيس التنفيذي لهيئة UKAEA في المملكة المتحدة، السيد إيان تشابمان.

2 المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، أثناء إلقاء كلمته في مؤتمر COP28 في دبي، بالإمارات العربية المتحدة، في كانون الأول/ديسمبر 2023.

مناقشة الوكالة بشأن طاقة الاندماج في مؤتمر COP28

وفي عام 2024، قامت الإدارة الأمريكية بزيادة التمويل المتاح لبحوث طاقة الاندماج زيادة كبيرة، إذ خصصت مبلغاً قدره 790 مليون دولار أمريكي للمكتب المعني بعلوم طاقة الاندماج التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة. وفضلاً عن ذلك، خُصِّص لبحوث الاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي مبلغ قدره 690 مليون دولار أمريكي من خلال ميزانية إدارة الأمن النووي الوطنية. واستُكمل ذلك ببرنامج ميزانيته 42 مليون دولار أمريكي يهدف إلى النهوض بالعلوم والتكنولوجيا التأسيسية لطاقة الاندماج بالقصور الذاتي، وهو برنامج سُمِّي "تسريع البحوث المتعلقة بعلوم وتكنولوجيا طاقة الاندماج بالقصور الذاتي" (Inertial Fusion Energy Science and Technology Accelerated Research). وبوجه عام، يمثِّل التمويل البالغ 1,58 مليار دولار أمريكي [35] استثماراً قياسياً من جانب الحكومة الأمريكية في مجال طاقة الاندماج والاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي. وإضافةً إلى ما سبق، اقترحت الحكومة توسيع نطاق الإعفاءات الضريبية لدعم مجموعة أوسع من تكنولوجيات الطاقة النظيفة، بما فيها طاقة الاندماج، في إطار قانون الحد من التضخم الصادر في عام 2022 [36].

وفي هذا المشهد الدينامي لطاقة الاندماج، تتضح معالم الشراكات بين القطاعين العام والخاص أكثر فأكثر. وأعلنت وزارة الطاقة الأمريكية وضع اتفاقات يُقدَّم بموجبها تمويل قدره 46 مليون دولار أمريكي إلى ثماني شركات خلال الأشهر الثمانية عشر الأولى من عملها الرامي إلى النهوض بالتصاميم وأنشطة البحث والتطوير المتعلقة بمحطات قوى الاندماج، وذلك في إطار برنامجها لتطوير الاندماج القائم على المعالم المرحلية البارزة. وقد اختيرت هذه الشركات من بين كيانات عديدة قدَّمت اقتراحات حدَّدت فيها خططها لإدخال طاقة الاندماج التجارية إلى السوق. وسيُمنح التمويل استناداً إلى المعالم المرحلية البارزة المحددة مسبقاً بشأن الاستغلال التجاري، وهي معالم مرحلية ينبغي بلوغها وتتحقق منها وزارة الطاقة الأمريكية. وفيما يخص المرحلة المقبلة، بدأت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة أيضاً بجمع المعلومات عن اقتراح إنشاء اتحاد في مجال طاقة الاندماج مشترك بين القطاعين العام والخاص [37]. ويهدف هذا الاتحاد إلى مضاعفة التمويل الفدرالي من خلال دمج المساهمات الواردة من الدولة والحكومات المحلية، واستثمارات القطاع الخاص، ومساعدات المؤسسات الخيرية.■

وتسلك اليابان مساراً مماثلاً. ففي عام 2023، اعتمد هذا البلد استراتيجيته الوطنية الأولى بشأن طاقة الاندماج [38]، التي تشدد على أهمية بناء صناعة محلية معنية بطاقة الاندماج، مع مشاركة أوسع من القطاع الخاص في أنشطة البحث والتطوير. وشملت هذه الاستراتيجية إنشاء المجلس الياباني لطاقة الاندماج من أجل تعزيز الصناعات المتصلة بها ووضع مبادئ توجيهية لتنظيم تكنولوجيات طاقة الاندماج. كذلك، أنشئ فريق عامل يُعنى تحديداً باللوائح الخاصة بالاندماج. وفي عام 2024، أعلنت الحكومة اليابانية وضع برنامج جديد للبحث والتطوير في مجال الاندماج كجزء من برنامجها المتعلق بالبحث والتطوير برنامج [39] (Moonshot)، وهو أمر يعزز التزامها بالنهوض بتكنولوجيا الاندماج. وتعتزم الحكومة اليابانية أيضاً إعطاء الأولوية للتعليم الخاص بطاقة الاندماج في المؤسسات الأكاديمية، بما يضمن تهيئة الجيل المقبل من العلماء والمهندسين بطريقة جيدة للمساهمة في هذا المجال. وتُستكمل هذه الجهود بالشراكة الاستراتيجية مع الولايات المتحدة الرامية إلى تسريع وتيرة تطوير طاقة الاندماج.■

وتوسِّع الصين نطاق برنامجها الخاص بطاقة الاندماج بخطوات سريعة، عن طريق زيادة الاستثمارات كل سنة [40]. وما يؤكد هذه الرؤية هو تشكيل اتحاد مخصَّص لتطوير طاقة الاندماج بقيادة المؤسسة الوطنية النووية الصينية. وتركز هذه المبادرة على الموصلات الفائقة في درجات الحرارة المرتفعة، والوحدات ذات القدرة العالية على تخزين الطاقة، وإنتاج التريتيوم. ويضم الاتحاد 25 من المعاهد البحثية والشركات الرئيسية التي تملكها الحكومة، بما يشمل بعضاً من أكبر شركات الطاقة والفولاذ في البلد. وأعلنت الحكومة إنشاء شركة وطنية جديدة لقيادة عملية تطوير قطاع صناعة الاندماج [41].■

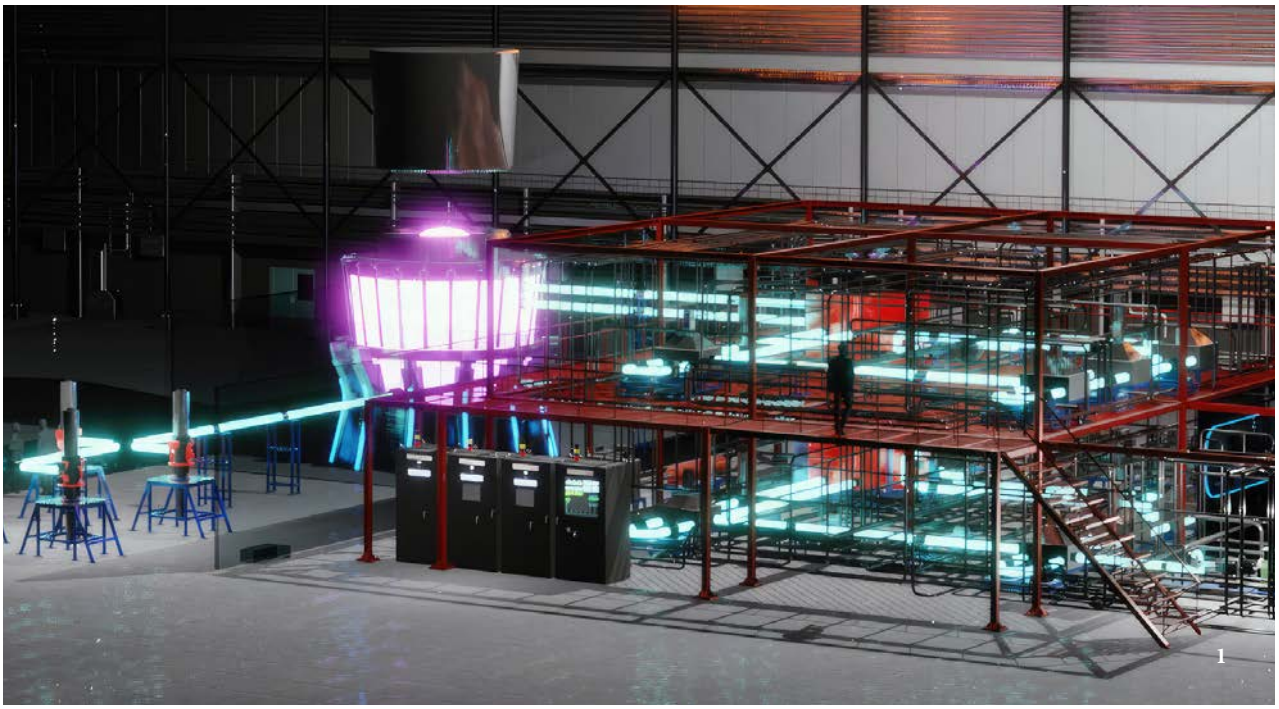
وفي تموز/يوليه 2024، أعلنت حكومة جمهورية كوريا استثمار مبلغ قدره 1,2 تريليون وون (نحو 900 مليون دولار أمريكي) لتطوير طاقة الاندماج. وتهدف هذه المبادرة، التي من المقرر البدء بتنفيذها في عام 2026 والتي ستستمر على مدى عقد من الزمن، إلى النهوض بتكنولوجيا محطات الاندماج من خلال شراكة بين القطاعين العام والخاص. وتشمل الخطة تشييد محطة تجريبية قادرة على توليد 100 ميغاواط من الكهرباء في ثلاثينيات هذا القرن، ومن المتوقع أن تبدأ العمليات في أربعينيات القرن الحالي. ويتمثل الهدف الرئيسي في إنشاء نظام مترابط لطاقة الاندماج يقوده القطاع الخاص [42].■

وقامت المفوضية الأوروبية، من بين جملة الخطوات التي تتخذها لوضع استراتيجية أوروبية شاملة للاندماج، بتنظيم المؤتمر المعني بخطة طاقة الاندماج في الاتحاد الأوروبي [43]. وسلَّطت هذه الفعالية الضوء على عدة أولويات رئيسية للاتحاد الأوروبي مثل الحاجة إلى تعزيز التعاون، وزيادة التمويل، وضمان اليقين الرقابي، وتنمية مهارات القوى العاملة.

وباعتبار ألمانيا بلداً مبادراً في الاتحاد الأوروبي، أعلنت الوزارة الاتحادية الألمانية للتعليم والبحوث أنها ستوفر لبحوث الاندماج بحلول عام 2028 أكثر من مليار يورو، إضافةً إلى المبلغ المخصص للمؤسسات البحثية والبالغ 370 مليون يورو (396 مليون دولار أمريكي).

وقد عُزِّز هذا التمويل المؤسسي بصورة أكبر من خلال برنامج Fusion 2024 الجديد لتمويل المشاريع [44]. ويرمي هذا البرنامج إلى النهوض بالتكنولوجيات والمكونات والمواد اللازمة لمحطات قوى الاندماج، مع التركيز على الاحتواء المغناطيسي والاندماج بالليزر. وتهدف المرحلة الأولى من برنامج Fusion 2024، المقرر استكمالها بحلول أوائل ثلاثينيات هذا القرن، إلى إحراز التقدم في المجال التكنولوجي، في حين ستركز المرحلة الثانية على دمج هذه التكنولوجيات في تصميم وظيفي لمحطة قوى اندماج. ويشدد البرنامج على أهمية البحوث التعاونية ذات المنحى التطبيقي باعتبارها شكلاً من أشكال الشراكات بين القطاعين العام والخاص يرمي إلى تسريع وتيرة التقدم نحو طاقة الاندماج التجارية.

الوثيقة التقنية الصادرة عن الوكالة بعنوان Plasma Physics and Technology Aspects of the Deuterium–Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy (فيزياء البلازما والجوانب التكنولوجية في دورة وقود الديوتيريوم-التريتيوم في سياق طاقة الاندماج)



1 رسم توضيحي لمرفق UNITY-1 القائم على دثار غير إشعاعي والهادف إلى إجراء اختبارات الدورة الحرارية ودعم مستخدميها، في مركز كيوتو للبحوث التابع لشركة Kyoto Fusioneering في اليابان. وقد بدأت العمليات التشغيلية المبكرة، ويُتوقع أن تبدأ حملات الاختبار الكاملة النطاق في عام 2026 (الصورة مهداة من شركة Kyoto Fusioneering، اليابان).

2 نائب وزير الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية السيد ديفيد تورك ووزير التعليم والرياضة والعلوم والتكنولوجيا في اليابان السيد ماساهيتو موریاما يعلنان عن الشراكة الاستراتيجية للنهوض بطاقة الاندماج (الصورة مهداة من وزارة الطاقة في الولايات المتحدة).

قمة مجموعة الدول السبع لعام 2024 (الصورة مهداة من الاتحاد الأوروبي).

وفي إيطاليا، أنشأت وزارة البيئة المنصة الوطنية للطاقة النووية المستدامة [45] التي يتمثل هدفها الرئيسي في وضع مبادئ توجيهية وخريطة طريق لتتبُّع وتنسيق مسار النهوض بالتكنولوجيات النووية الجديدة في الأجلين المتوسط والطويل. ويشمل ذلك استكشاف الإمكانات التي توفرها طاقة الاندماج لدعم تحقيق الهدف المتمثل في إزالة الكربون بشكل كلي بحلول عام 2050. وستشمل هذه المنصة مجموعة واسعة من الجهات المعنية، بما في ذلك مؤسسات الإدارة العامة والشركات والرابطات التجارية والجامعات والمؤسسات البحثية والمجتمع المدني.

وتحت الرئاسة الإيطالية لمجموعة الدول السبع، سلطت المجموعة الضوء على طاقة الاندماج بالدعوة إلى التعاون الدولي من أجل التعجيل بتطوير تكنولوجيا الاندماج واستغلالها على النطاق التجاري. وتؤكِّد هذه الجهود الحاجة إلى وجود لوائح مُحكمة في مجال الأمان وإلى إنشاء سلاسل إمداد دولية وتنمية القوى العاملة. والتزمت مجموعة الدول السبع بتعزيز الأنشطة التعاونية وتشجيع الاستثمار وإنشاء أفرقة عاملة لتقاسم أفضل الممارسات، ورحبت بدور الوكالة ودولها الأعضاء في هذا الصدد [46].■

وفي عام 2024، وقَّعت كندا والمملكة المتحدة على اتفاق [47] للعمل معاً بشكل أوثق على تطوير طاقة الاندماج في مجالات منها البحوث والتنسيق الرقابي وتحسين مهارات القوى العاملة. وسيتعاون البَلَدان من أجل دعم نشر الاندماج في جميع أنحاء العالم. ورغم أن كندا لم تعلن عن إنشاء برنامج وطني رسمي معني بالاندماج، ففي عام 2024، نشرت المختبرات النووية الكندية تقريراً بعنوان Fusion Energy for Canada [48]، يُعدُّ بمثابة استراتيجية أولية وخريطة عمل في مجال الاندماج. ويدعو التقرير الحكومة الكندية إلى التعجيل بتحفيز إيجاد منظومة معنية بالاندماج من خلال وضع سياسة واضحة وتكليف محدد في هذا المجال. والهدف من ذلك هو أن تصبح كندا بلداً رائداً على المستوى الدولي في مجال تكنولوجيات وخدمات طاقة الاندماج، من أجل إيضاح إمكانية توليد الطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الاندماج واعتمادها في ثلاثينات وأربعينات هذا القرن ونشر طاقة الاندماج التجارية في كندا بحلول عام 2050.■

ووفقاً لهذه الرؤية، وقعت المختبرات النووية الكندية على اتفاق تعاون مع هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة من أجل تطوير تكنولوجيات لمعالجة التريتيوم [49]. ووقعت المختبرات النووية الكندية أيضاً على

رابطة صناعة الاندماج:
Commercializing Fusion Energy
(نحو الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج)

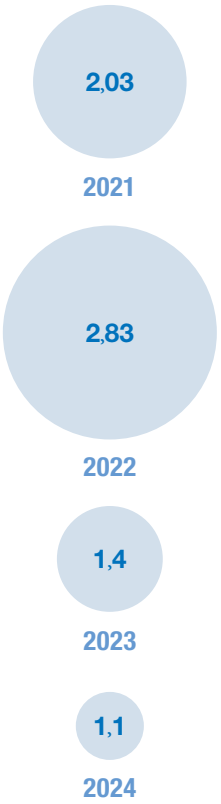
اتفاقات ومشاريع مع شركة Stellarex [50] وشركة General Fusion [51]، بما شمل تأسيس شركة Fusion Fuel Cycles بالاشتراك مع شركة Kyoto Fusioneering [52]، من أجل تشييد وتشغيل مرفق UNITY-2 لاختبارات دورة الوقود النووي ومستخدميها. ومن المقرر إدخال المرفق المذكور في الخدمة بحلول نهاية عام 2025 على أن يعمل بكامل طاقته بحلول منتصف عام 2026، بهدف دعم التطوير المتكامل لدورة وقود الديوتيريوم-التريتيوم بدءاً من مرحلة تفريغ الوقود حتى مرحلة التنقية والإمداد، وإيضاح إمكانية تطوير تكنولوجيا كفؤة لمعالجة التريتيوم في الظروف المحددة وبالمعدلات المطلوبة.■

تنمية استثمارات القطاع الخاص والاستثمارات بالمساهمة في الملكية

ويشهد الاستثمار في قطاع صناعة طاقة الاندماج نمواً مطرداً عاماً بعد عام. وفي حين جرت العادة فيما مضى على أن معظم الاستثمارات (قرابة 70%) تذهب إلى شركات الاندماج في الولايات المتحدة الأمريكية، فقد شهد عام 2023 توسعاً كبيراً من حيث الاستثمارات بالمساهمة في الملكية في شركات الاندماج العاملة في مجموعة أوسع من البلدان [53]. وتشمل هذه البلدان إسرائيل وألمانيا والسويد والصين وفرنسا وكندا واليابان، مما يشير إلى الطفرة التي يشهدها مجال تطوير طاقة الاندماج في الاهتمام والتمويل على الصعيد العالمي.

وفي رابع تقرير سنوي تصدره رابطة صناعة الاندماج، والذي حمل عنوان The Global Fusion Industry in 2024 (صناعة الاندماج العالمية في عام 2024) [15]، أشارت الرابطة إلى أن قطاع صناعة طاقة الاندماج قد اجتذب الآن ما مجموعه 7,3 مليارات دولار من الاستثمارات، صعوداً من 6,2 مليارات في عام 2033. وأحصى التقرير 45 شركة خاصة عاملة في مجال طاقة الاندماج، من الشركات الراسخة وحتى المستجدة. ورغم أن الولايات المتحدة الأمريكية لا تزال في الصدارة بما مجموعه 25 شركة عاملة في مجال طاقة الاندماج (بما في ذلك العديد من الشركات الكبرى)، فإن قطاع الصناعة يغدو أكثر تنوعاً على الصعيد الجغرافي، حيث يوجد 13 من البلدان التي لديها على الأقل شركة واحدة عاملة في مجال طاقة الاندماج، ومنها أربعة بلدان تستضيف أكثر من ثلاث شركات، وهي ألمانيا والصين والمملكة المتحدة واليابان.■

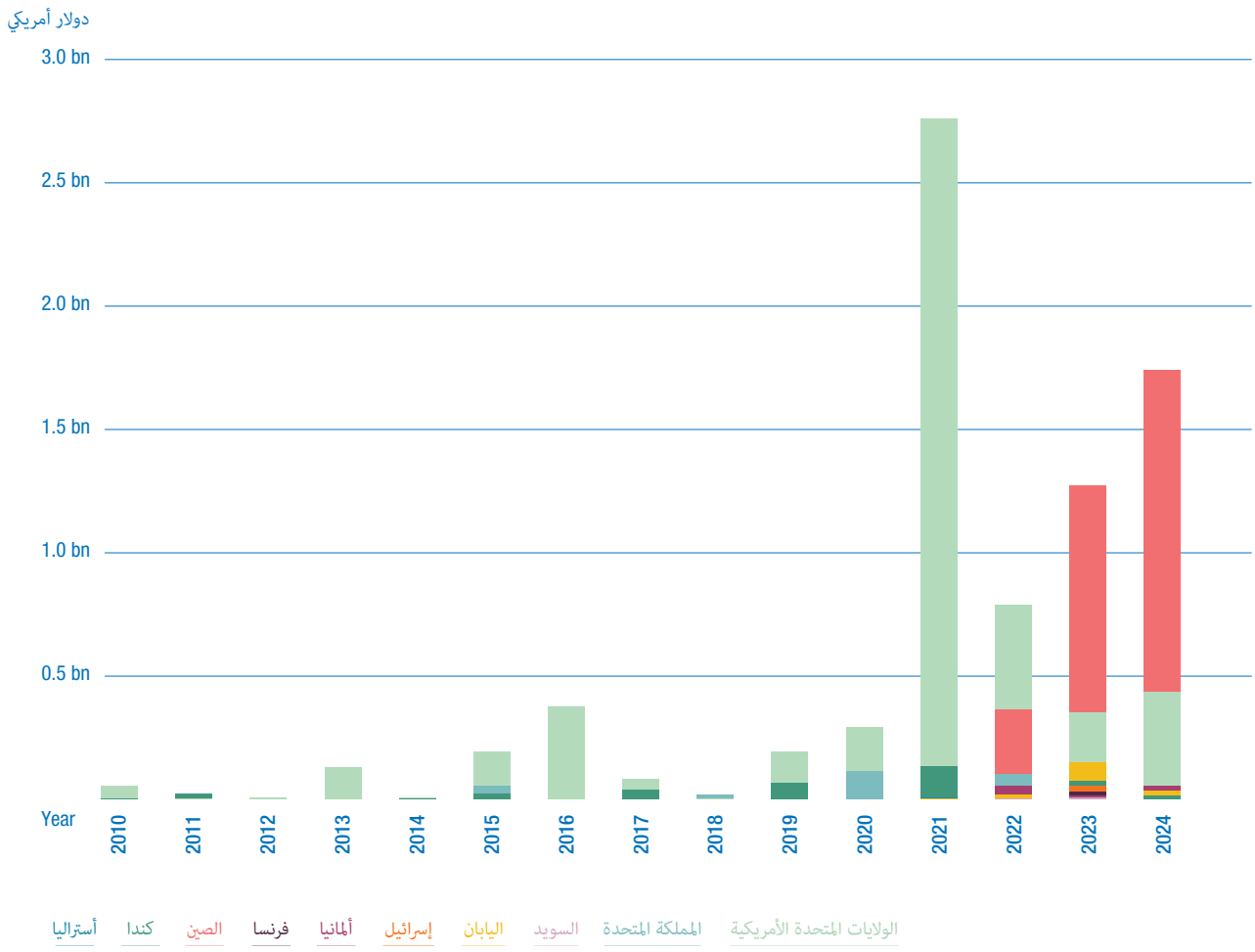
التمويل المعلن من رابطة صناعة الاندماج (بمليارات الدولارات الأمريكية)



رابطة صناعة الاندماج: The Global Fusion Industry in 2024 (صناعة الاندماج العالمية في عام 2024)

بيان قادة مجموعة الدول السبع G7 في قمة أبوليا

الاستثمارات بالمساهمة في ملكية شركات طاقة الاندماج بين عامي 2010 و 2024 بحسب الدول الأعضاء [54]



قاعدة بيانات Fusion Energy Base

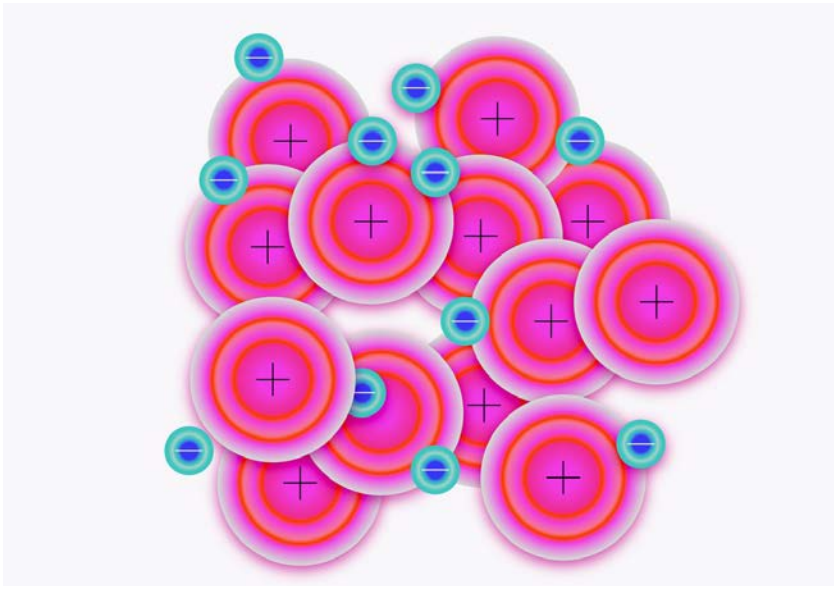
وضع النُّهُج الرقابية

تعمل الهيئات الرقابية وواضعو القوانين بشكل متزايد على التصدي للتحديات واغتنام الفرص في مجال طاقة الاندماج. وفي تموز/يوليه 2024، وقع رئيس الولايات المتحدة السيد جو بايدن قانون التعجيل بنشر التكنولوجيات النووية المتقدمة والمتعددة الاستخدامات لأغراض إنتاج الطاقة النظيفة لعام 2023 (قانون ADVANCE لعام 2023) [55]، والذي يتضمن أحكاماً من قانون طاقة الاندماج الذي يحظى بتوافق آراء الحزبين الكبيرين في الولايات المتحدة [56]. ويهدف هذا التشريع إلى تيسير تطوير طاقة الاندماج وصولاً إلى الاستغلال التجاري من خلال النص على صلاحيات رقابية واضحة وتوفير حوافز لدعم الاستثمار. وتدعم هذه الأحكام قرار الهيئة الرقابية النووية السابق بفصل التنظيم الرقابي لطاقة الاندماج عن الطاقة الانشطارية، بحيث تخضع نظم طاقة الاندماج المعتزم تطويرها على المدى القريب للتنظيم ضمن الإطار الرقابي الخاص بالمواد الثانوية، على غرار معجِّلات الجسيمات. وفي عام 2023، أصبحت كاليفورنيا أول ولاية في الولايات المتحدة تعترف بطاقة الاندماج باعتبارها تكنولوجيا منفصلة ومتمايزة عن الطاقة الانشطارية. وتعمل الهيئة الرقابية النووية حالياً على صياغة إرشادات بشأن ترخيص نظم الاندماج [57].

وأكدت حكومة المملكة المتحدة أن جميع النماذج الأولية المخطط لها لمرافق طاقة الاندماج ستظل خاضعة للتنظيم الرقابي من قبل وكالة البيئة والمديرية العامة لشؤون الصحة والأمان، خلافاً لمحطات القوى النووية التي يتولى تنظيمها الرقابي مكتب الرقابة النووية.

وبالإضافة إلى ذلك، فقد أصدر الفريق العامل المعني بطاقة الاندماج، الذي أنشأته شبكة Agile Nations والذي يضم في عضويته كندا والمملكة المتحدة واليابان بالإضافة إلى البحرين وسنغافورة بصفة مراقبين، ورقة سياسات تتضمن توصيات مشتركة [58] تقرُّ بالمساهمة المهمة التي يمكن أن تقدِّمها طاقة الاندماج في مواجهة التحديات العالمية التي يطرحها تغير المناخ وأمن الطاقة. وتسلط ورقة السياسات الضوء أيضاً على فوائد اتِّباع نهج منسق في وضع اللوائح التي تعمل عدة بلدان الآن على اعتمادها لتنظيم طاقة الاندماج؛ وتدعو إلى وضع إطار رقابي واضح ينطبق على مرافق طاقة الاندماج بصرف النظر عن التكنولوجيا المستخدمة ويُرسي آليات ملائمة لحماية الناس والبيئة، بمراعاة التناسب مع مخاطر طاقة الاندماج والحفاظ في الوقت نفسه على الشفافية ودعم الابتكار.

وتسلك ألمانيا مساراً مماثلاً، حيث عقدت لجنة التعليم والبحوث وتقييم التكنولوجيا جلسة استماع علنية في عام 2024 سلطت فيها الضوء على الحاجة إلى وضع إطار قانوني عملي ومستقل وداعم للابتكار لتنظيم طاقة الاندماج [59]، وذلك بهدف تشجيع القطاع الخاص على الاستثمار ودعم إنشاء أسواق لتكنولوجيات الاندماج.■



الرسم التوضيحي مهدى من آنا كوفا، الولايات المتحدة الأمريكية.

الآفاق

تحليل للاتجاهات في بعض القطاعات المحددة وتوزيع الأعمال الجارية بشأن طاقة الاندماج في مختلف المناطق حول العالم.

الآفاق القطاعية

نوجز فيما يلي الأمثلة الرئيسية على التعاون بين مطوري طاقة الاندماج ومستخدميها النهائيين من أجل إحراز تقدم صوب الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج.

قطاع صناعات النفط والغاز

تدرك صناعات النفط والغاز أنها بحاجة إلى تنويع حافظة استثماراتها في ظل الجهود العالمية للتقليل تدريجياً من استخدام الوقود الأحفوري بلا قيود من أجل تحقيق صافي انبعاثات صفري بحلول عام 2050، ولذلك فهي تضخ قدراً كبيراً من الاستثمارات في الشركات العاملة في مجال طاقة الاندماج. وبالإضافة إلى شركتي Chevron وShell، تشمل قائمة الشركات الكبرى العاملة في مجال الوقود الأحفوري التي تستثمر في طاقة الاندماج شركتي Occidental و Eni، وشركة تكرير النفط النرويجية Equinor [60].

وتعمل شركة TAE Technologies، وهي شركة ناشئة في كاليفورنيا، على استكشاف إمكانية استخدام تكنولوجيا طاقة الاندماج التي طورتها لتوفير الكهرباء لمرافق استخلاص الكربون مباشرة من الهواء التي تعمل على تطويرها شركة Oxy Low Carbon Ventures، وهي بدورها شركة تابعة لشركة النفط Occidental. وفي حزيران/يونيه 2024، وقعت الشركتان مذكرة تفاهم لاستكشاف فرص الاستغلال التجاري لتكنولوجيا الاندماج التي طورتها شركة TAE Technologies لتوفير الكهرباء والحرارة بلا انبعاثات كربونية من أجل تشغيل أجهزة استخلاص الكربون مباشرة من الهواء. وقد جمعت شركة TAE Technologies، التي تأسست في عام 1998، استثمارات قدرها 1,2 مليار دولار أمريكي من شركات تكنولوجية عملاقة مثل غوغل، ومصرف الاستثمار غولدمان ساكس، وشركتي النفط Shell وChevron [61]. وتهدف الشركة إلى إنشاء محطة اندماجية تُوصَّل بالشبكة الكهربائية بحلول أوائل ثلاثينات هذا القرن.

ورغم أن تكنولوجيا استخلاص الكربون مباشرة من الهواء لم تثبت فعاليتها بعد، فإن بعض الخبراء يرون أنها قد تؤدي دوراً حيوياً في الوصول بصافي انبعاثات الكربون إلى مستوى الصفر عن طريق إزالة ثاني أكسيد الكربون من الهواء وإصلاح الأضرار التي لحقت بالغلاف الجوي طيلة عقود من الزمن. بيد أن استخدام هذه التكنولوجيا بطريقة مستدامة تقنياً ومجدية اقتصادياً يتطلب مصدراً لتوليد الطاقة الميسورة التكلفة بلا انقطاع وبلا انبعاثات من غازات الدفيئة، مثل طاقة الاندماج.

وبالإضافة إلى استثمارها في شركة TAE Technologies، فقد استثمرت شركات Shell و Chevron وEquinor أيضاً في شركة Zap Energy. وتتخذ شركة Zap Energy من سياتل في الولايات المتحدة الأمريكية مقرًّا لها، وتهدف إلى توصيل أولى محطاتها الاندماجية بالشبكة الكهربائية في غضون عقد من الزمن.

كذلك استثمرت شركات Eni وEquinor وShell في شركة CFS. وفي عام 2023، وقعت شركتا Eni وCFS اتفاق تعاون لدعم إنتاج تكنولوجيا شركة CFS على النطاق الصناعي. ويُتوقع أن يبدأ تشغيل المحطة الاندماجية التابعة لشركة CFS في أوائل ثلاثينات هذا القرن [56]. وقد حصلت شركة CFS حتى الآن على استثمارات بقيمة 2 مليار دولار أمريكي. وتمتلك شركة Eni أيضاً حصة قدرها 25% من مرفق DTT الجاري تطويره بالقرب من روما في إيطاليا، والذي يركِّز على البحوث بما يشمل إيجاد حلول لاستخلاص الحرارة الناتجة عن عملية الاندماج [62].■

قطاع التكنولوجيا

أعربت شركات التكنولوجيا العالمية صراحة عن رغبتها في استخدام طاقة الاندماج لمواكبة الزيادة الهائلة في احتياجاتها من الطاقة اللازمة لتشغيل مراكز البيانات التابعة لها، والتي ترجع إلى التطور السريع في نظم الذكاء الاصطناعي التي تدعمها هذه المراكز. ونُقل عن سام ألتمان، المدير التنفيذي لشركة OpenAI، أنه قال في كانون الثاني/يناير 2024 إن ما سيحتاجه تطوير الذكاء الاصطناعي في المستقبل ليس أقل من "طفرة" كبرى على غرار ما يمكن أن تتيحه طاقة الاندماج [63].

وبحسب التقارير فقد استثمر السيد ألتمان نفسه أكثر من 375 مليون دولار أمريكي في شركة Helion Energy، وهي شركة عاملة في مجال تطوير تكنولوجيا الاندماج في الولايات المتحدة الأمريكية، ويشمل المستثمرون فيها أيضاً ريد هوفمان أحد مؤسسي موقع LinkedIn، وبيتر ثيل مؤسس موقع eBay، وداستن موسكوفيتز الشريك المؤسس في موقع Facebook. وتنظر شركة مايكروسوفت، وهي أحد المستثمرين في شركة OpenAI، في طاقة الاندماج من بين مصادر أخرى للطاقة النظيفة، في إطار سعيها إلى أن تحقيق رصيد سالب من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بحلول عام 2023.

وفي آذار/مارس 2023، وقعت شركة مايكروسوفت على اتفاق لشراء الكهرباء من أولى محطات الطاقة الاندماجية التابعة لشركة Helion Energy، والمقرر حالياً بدء تشغيلها في عام 2028 بقدرة إنتاجية قدرها

50 ميغاواط (كهربائي). وقد جمعت شركة Helion Energy استثمارات قدرها 0,6 مليار دولار أمريكي، وهي تعمل على تطوير النسخة السابعة من النموذج الأولي لجهازها الذي تقول إنه سيوضح إمكانية إنتاج الكهرباء [64].

وقد كان بيل غيتس، أحد مؤسسي شركة مايكروسوفت، وجيف بيزوس، مؤسس شركة Amazon للبيع بالتجزئة عبر الإنترنت، من بين كبار المستثمرين في الشركات الناشئة العاملة في مجال طاقة الاندماج، بما في ذلك من خلال صندوق الاستثمار الذي أنشأه غيتس باسم Breakthrough Energy Ventures، والذي اجتذب أيضاً مساهمات من كل من رجل الأعمال البريطاني ريتشارد برانسون، وعملاق الإعلام مايكل بلومبرغ، وجاك ما، أحد مؤسسي شركة Alibaba الصينية للبيع بالتجزئة عبر الإنترنت. وفي عام 2019، قدم الصندوق بالاشتراك مع مستثمرين آخرين استثماراً أولياً قدره 115 ملايين دولار أمريكي في شركة CFS [65]. ويعود اهتمام السيد بيزوس بالاستغلال التجاري لطاقة الاندماج إلى عام 2011 على الأقل، حين انضم إلى مجموعة مستثمرين آخرين لاستثمار 20 مليون دولار أمريكي في شركة ناشئة كندية معنية بالاندماج هي General Fusion، وقد جمعت هذه الشركة استثمارات بلغ مجموعها 0,3 مليار دولار أمريكي وتعمل على تطوير الاندماج القائم على المستهدفات الممغنطة.■

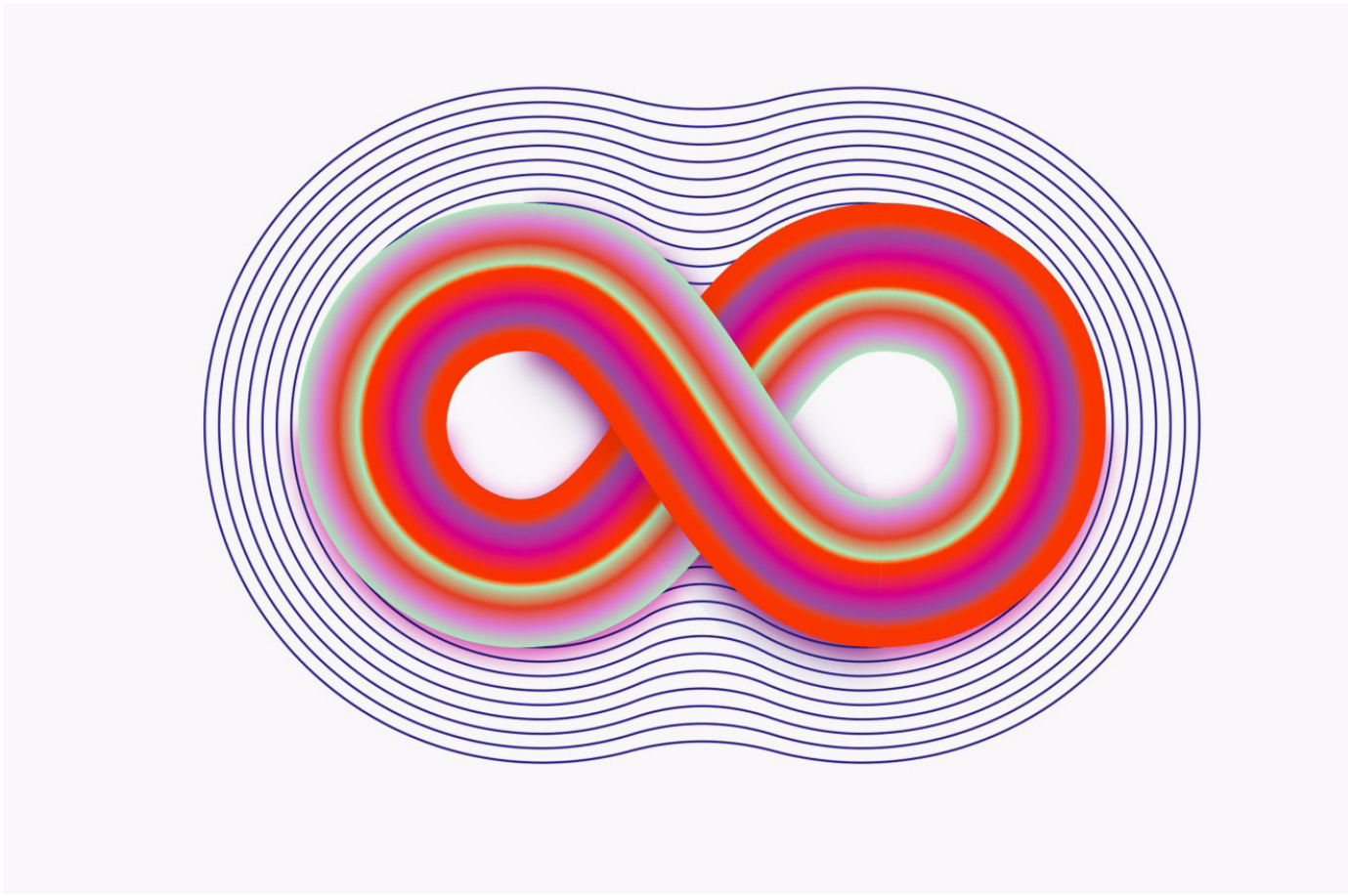
قطاع صناعة السيارات الكهربائية

في كانون الثاني/يناير 2024، صرحت شركة nT-Tao، وهي شركة ناشئة إسرائيلية عاملة في مجال الاندماج ومدعومة من شركة Honda Motor اليابانية بأنها تخطط لتطوير محطات قوى اندماجية صغيرة الحجم لاستخدامها كمحطات لشحن السيارات الكهربائية، بهدف بدء الاستغلال التجاري لهذه التكنولوجيا في ثلاثينات هذا القرن.

وبحسب الشركة، فسوف تتراوح قدرة محطة الشحن الواحدة بين 10 000 و 20 000 كيلوواط، وستكون صغيرة بما يكفي لتسعها حاوية بضائع، وقد تمكنت الشركة حتى الآن من جمع تمويل بلغ 28 مليون دولار أمريكي من المستثمرين، بما في ذلك منهم شركة التأمين اليابانية Mitsui Sumitomo وشركة صناعة السيارات Honda Motor [66]، التي ترى أن طاقة الاندماج يمكن أن تؤدي إلى طفرة في قطاع السيارات الكهربائية [67].

وفي الصين، اشترت شركة Nio لصناعة السيارات حصة قدرها 20% من شركة Neo Fusion الناشئة العاملة في مجال تكنولوجيا الاندماج، والمملوكة بنسبة 50% لشركات وهيئات استثمار حكومية في مقاطعة آنهوي. وستعمل الشركة، التي تزيد قيمة رأس مالها المسجل على 723 مليون دولار أمريكي، على إجراء أنشطة للبحث والتطوير بهدف تحقيق الاستغلال التجاري لتكنولوجيا الاندماج على الصعيد العالمي في غضون عقدين من الزمن [68].■

الرسم التوضيحي مهدى من آنا كوفا، الولايات المتحدة الأمريكية.



سلاسل الإمداد

أرسى مشروع إيتير أساساً متيناً لإنشاء سلسلة إمداد عالمية في مجال طاقة الاندماج. ولدى كل وكالة من الوكالات المعنية التابعة للأعضاء المشاركين في مشروع مفاعل إيتير عقود مبرمة مع مجموعة من الشركات ومؤسسات البحث والتطوير، لتقديم مساهمات عينية للمشروع من خلال طائفة واسعة من ترتيبات الشراء. وتوفر هذه الوكالات كل لوازم المشروع، من قطع الأوعية الفراغية حتى الجيروترونات ونُظم الإمداد بالكهرباء العالية الفلطية، مما أدى إلى إنشاء سلسلة إمداد أصبحت الآن متاحة للشركات الخاصة الناشئة العاملة في مجال الاندماج.

ووفقاً لرابطة صناعة الاندماج [69]، فقد ارتفع إنفاق الشركات العاملة في مجال طاقة الاندماج على سلسلة الإمداد في عام 2023 إلى أكثر من 612 مليون دولار أمريكي، مقارنة بعام 2022 الذي كانت قيمة الإنفاق فيه نحو 489 مليون دولار.

ومن المرجح أن هذه الأرقام أقل من الواقع بالنظر إلى استنادها إلى استقصاء لم ترد عليه جميع الشركات. وكان النصيب الأكبر من النفقات موجهاً إلى المفردات المتخصصة التي لا ينفرد بها مجال الاندماج، مثل مضخات التفريغ، إلى جانب المواد الخام وعقود الخدمات الهندسية والوقود. وتتوقع الشركات أن يزيد إنفاقها على سلسلة الإمداد بنسبة 24% في عام 2024 مقارنة بعام 2023، بالنظر إلى استثمار 77% من الشركات في التوسع في القدرات لدعم صناعة الاندماج.

وأحد الأمثلة على زيادة الأنشطة المتعلقة بسلسلة الإمداد اتفاق شركة الاندماج الكائنة في المملكة المتحدة Tokamak Energy في تموز/يوليه 2023 مع شركة Sumitomo Corporation اليابانية على التعاون من أجل التوسع في الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج اليابان وحول العالم. وبموجب هذا الاتفاق، ستساهم الثانية بخبراتها واستثماراتها في مشاريع مشتركة مع الشركة الأولى بهدف تعزيز سلسلة الإمداد العالمية في مجال طاقة الاندماج. وتهدف شركة Sumitomo Corporation إلى أن تصبح من الشركات الرائدة عالميا في تمويل تشييد وتشغيل محطات القوى الاندماجية، في حين تسعى شركة Tokamak Energy إلى التعجيل بإنتاج أجهزة التوكاماك الكروية التي تطورها على النطاق الصناعي وبدء استغلالها تجارياً بحلول نهاية عقد الثلاثينات من هذا القرن [70]. وقد جمعت شركة Tokamak Energy حتى الآن استثمارات بقيمة 0,3 مليار دولار أمريكي.

وتعمل الشركة أيضاً على تطوير تكنولوجيا المواد المغناطيسية الفائقة التوصيل في درجات الحرارة

الرسم التوضيحي مهدى من آنا كوفا، الولايات المتحدة الأمريكية.

المرتفعة (مواد HTS)، وصرحت في كانون الثاني/يناير 2023 بأنها قد وقعت اتفاقاً مع شركة Furukawa Electric اليابانية لتوريد مئات الكيلومترات من أشرطة مواد HTS لاستخدامها في النموذج الأولي لجهاز الاندماج الذي تعمل على تطويره. وقد طورت شركة Furukawa Electric هذه الأشرطة ووفرتها، ويجري إنتاجها حالياً في موقع في نيويورك بالولايات المتحدة الأمريكية [71].

وفي عام 2023، وقعت شركة Nucor Corporation، وهي أكبر شركة في أمريكا الشمالية لصناعة الصُّلب وإعادة تدويره، اتفاقاً مع شركة Helion Energy لتشييد محطة قوى اندماجية بقدرة 500 ميغاواط (كهربائي) في مرفق Nucor لتصنيع الصُّلب في الولايات المتحدة الأمريكية. ووفقاً للشركة، فإن هذا الاتفاق هو الأول من نوعه على هذا النطاق في مجال طاقة الاندماج ومن المتوقع أن يمهِّد الطريق لإزالة الكربون من قطاع الصناعات التحويلية على الصعيد العالمي [72].

وتهدف شركة Longview Fusion Energy Systems إلى التوسع في الاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي باستخدام الليزر لأغراض إنتاج الكهرباء على نطاق تجاري. وفي نيسان/أبريل 2024، تعاقدت شركة Longview Fusion Energy Systems مع شركة Fluor Corporation من أجل تصميم وتشييد محطة قوى مؤلفة من وحدات نمطية قائمة على استخدام أجهزة ليزر كفؤة متقدمة وضبطها باستخدام الذكاء الاصطناعي. وسيكفل التصميم الأولي لهذه المحطة توليد الطاقة بقدرة تتراوح بين 1 غيغاواط و1,6 غيغاواط، على أن يتم تصميم محطة أولية بقدرة 440 ميغاواط بحلول عام 2027 وتشغيلها بحلول عام 2032. ومن بين التحديات الرئيسية في هذا الصدد كيفية التصرف في التريتيوم المشع وتكييف البخارالناتج من عملية الاندماج مع متطلبات الشبكة الكهربائية. وتنظر شركة Longview Fusion Energy Systems في خيارات مختلفة لموقع تشييد المحطة، بما في ذلك إعادة استخدام المحطات العاملة بالفحم للمحافظة على فرص العمل والاستفادة من البنية الأساسية.

وفي أيار/مايو 2024، وقعت هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة ومركز Rež للبحوث في الجمهورية التشيكية اتفاقاً متعدد السنوات لاختبار أشرطة HTS للاستخدام في مرفق STEP في المملكة المتحدة، وهو نموذج أولي لمحطة اندماجية. وينطوي الاتفاق على تطوير جهاز اختبار فريد من نوعه لدراسة تأثير أطياف النيوترونات ذات الصلة بالاندماج في أشرطة HTS التي ستُستخدم في احتواء البلازما عند درجات حرارة تصل إلى 150 مليون درجة مئوية. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل هذا الجهاز في عام 2026، حيث سيوفر بيانات عن مستوى متانة أشرطة HTS، ومن ثم المساعدة على تصميم وتحديد طول عمر هذه الأشرطة التي ستستخدم في مرفق STEP.■

قطاع التزويد بالمرافق العامة

تهدف شركة التزويد بالمرافق العامة Constellation Energy، التي يقع مقرها في الولايات المتحدة وتشغِّل بالفعل 21 مفاعلاً نووياً في أنحاء مختلفة من ذلك البلد، إلى خفض صافي انبعاثاتها من ثاني أكسيد الكربون إلى مستوى الصفر بحلول عام 2030، وسوف تتولى إدارة أنشطة تسويق ونقل الكهرباء التي تنتجها أولى محطات القوى الاندماجية التابعة لشركة Helion Energy [73] والمقرر أن يبدأ تشغيلها في عام 2028 وأن تزود شركة مايكروسوفت بالكهرباء.

كذلك تتطلع شركة Ontario Power Generation، وهي واحدة من أكبر شركات التزويد بالكهرباء في كندا، إلى المساهمة في نشر محطة اندماجية. وفي حزيران/يونيه 2024، أعلنت الشركة أنها وقعت مذكرة تفاهم لاستكشاف إمكانيات تطوير ونشر طاقة الاندماج في مقاطعة أونتاريو بالتعاون مع شركة Stellarex [74]، وهي شركة عاملة في مجال الاندماج في الولايات المتحدة. وقد صرحت شركتا Ontario Power Generation وStellarex بأنهما ستستكشفان إمكانية إنشاء مركز امتياز في مجال طاقة الاندماج وأنهما ستعملان على تعريف الأنشطة التي يمكن الاضطلاع بها في المستقبل لتحديد موقع لمحطة اندماجية قائمة على تكنولوجيا الستللاريتور في مقاطعة أونتاريو وتنفيذ هذه المحطة.

وفي عام 2022، أعلنت شركة كندية أخرى تعمل في مجال التزويد بالمرافق العامة، وهي شركة Bruce Power، عن توقيعها على اتفاق مع كل من شركة General Fusion والمعهد الكندي للابتكار في المجال النووي، من أجل التعاون على تيسير نشر القوى الاندماجية في مقاطعة أونتاريو. وبالنظر إلى أن الطاقة النووية توفر بالفعل قرابة ثلثي الكهرباء المنتجة في المقاطعة، صرحت المؤسسات الثلاث بأنها ستسعى إلى الاستفادة مما يتوفر في المنطقة بالفعل من التكنولوجيات والمهارات والخبرات في مجال الطاقة النظيفة. ومع التركيز على التواصل مع الجهات المعنية، ذكرت هذه المؤسسات أنها ستسعى إلى إذكاء الوعي بين السكان والشركات والصناعات في المقاطعة بشأن ما تنطوي عليه طاقة الاندماج من إمكانات لتغيير مشهد توليد الطاقة النظيفة في أونتاريو [75].

وذكرت بعض التقارير أن شركة Anhui Province Energy Group Company Limited، وهي شركة إمداد صينية كبرى، قد استثمرت في شركة الاندماج الناشئة Neo Fusion [76].■

رابطة صناعة الاندماج:
The Fusion Industry Supply Chain 2024
(سلسلة الإمداد في قطاع صناعة الاندماج لعام 2024)

الآفاق الإقليمية

أفريقيا

تونس والجزائر وليبيا ومصر والمغرب

في أفريقيا، لا تزال أنشطة البحث والتطوير التي تركز تحديداً على طاقة الاندماج محدودة في الوقت الراهن. بيد أنَّ المنطقة تتوافر فيها الخبرات والمهنيون من ذوي المهارات في مختلف المجالات ذات الصلة بالاندماج. وفي مجال بحوث علوم البلازما المتصلة بالاندماج، هناك عدد من العلماء الذين يعملون فرادى وفي أفرقة بحثية في بلدان متعددة. فعلى سبيل المثال، تتخذ تونس والجزائر وليبيا ومصر والمغرب خطوات لتعزيز التعليم في مجال فيزياء البلازما. كما أنَّ الجامعات في هذه البلدان تشارك في البحوث بنشاط، مع التركيز على مجالات مثل بلازما الترددات الراديوية وتطبيقها، وعلوم المواد، وكيمياء البلازما، ونظرية البلازما ونمذجتها. وبالإضافة إلى ذلك، تستضيف ليبيا ومصر جهازي توكاماك، مما يعزز مساهمتهما في الأوساط العلمية على الصعيد العالمي. وتسلط هذه المبادرات الضوء على تزايد مشاركة أفريقيا في التعليم والبحوث في مجالي فيزياء البلازما وعلوم الاندماج.■

آسيا والمحيط الهادئ

أستراليا ونيوزيلندا

في أستراليا، يعمل المحفل الأسترالي المعني بمشروع مفاعل إيتير، وهو شبكة تضم علماء ومهندسين من تخصصات شتى، على تنسيق البحوث في مجال الاندماج. وتركز الجهود البحثية على عمليات تشخيص البلازما، ونظرية البلازما ونمذجتها، ودراسات المواد لأغراض تطبيقات الاندماج. وتستضيف أستراليا أيضاً شركة HB11 Energy، وهي شركة خاصة تعمل في مجال الاندماج وتركز على الاندماج القائم على الليزر.

وفي نيوزيلندا، جمعت الشركة الخاصة Openstar Technologies تمويلاً بلغ 12 مليون دولار أمريكي لتطوير تكنولوجيات الاندماج استناداً إلى نهج المجال المغناطيسي المحلَّق ذي القطبين (levitated dipole).■

الصين

تستضيف الصين أكثر من اثني عشر من أجهزة الاندماج التجريبية المخطط لإنشائها أو قيد التشغيل أو التشييد بالفعل. وتقوم على دعم هذه الجهود شركات صناعية مملوكة للدولة بالإضافة إلى الجامعات ومعاهد البحوث. وقد حققت أجهزة الاندماج الرئيسية مثل جهاز EAST وجهاز HL-3 نتائج تجريبية ممتازة. وتستفيد الصين من هذه النجاحات عن طريق الاستثمار في مشاريع الاندماج المقبلة، بما في ذلك مشروع BEST ومشروع CFETR، مما يمهِّد الطريق لنشر محطات الاندماج. وبالإضافة إلى ذلك، تركز الصين على تنمية القوى العاملة المتخصصة في مجال الاندماج، وتستهدف تدريب 1000 عالم جديد متخصص في فيزياء البلازما. وتعكف الصين أيضاً على تشييد مرفق بحوث باسم مرفق البحوث الشاملة في مجال تكنولوجيا الاندماج، يُشار إليه بالمختصر الإنكليزي CRAFT، ليكون منصة لتطوير واختبار مكونات محطات طاقة الاندماج. ومن المتوقع أن تكتمل أعمال تشييد المرفق في عام 2025 [77].

وهناك أيضاً عدة شركات تستثمر بكثافة في مجال بحوث الاندماج والعديد من المشاريع المخطط لها [78]. وفي عام 2024، أعلنت الحكومة عن تأسيس شركة وطنية جديدة [79] تعمل على تنفيذ خطط طموحة لتشييد محطة تجريبية للبحوث الهندسية، وهي حالياً في مرحلة التصميم النظري. وتسعى هذه المحطة إلى توليد 300 ميغاواط من القوى الاندماجية في وضع التشغيل في الحالة المستقرة و600 ميغاواط في وضع التشغيل النبضي، مع قدر من المرونة لإدخال تعديلات خلال مرحلة التصميم. ومن المقرر أن تبدأ أعمال التشييد بحلول عام 2030، ويُتوقع الانتهاء من تركيب جميع الأجهزة بحلول عام 2035. وبغية دعم هذه الجهود، يجري العمل على ترقية جهاز التوكاماك HL-3 للتمكين من إجراء تجارب اندماج الديوتيريوم-التريتيوم. ومن المتوقع أن تكتمل أعمال الترقية بحلول عام 2027، بيد أن بدء تشغيل عمليات اندماج الديوتيريوم-التريتيوم سيتوقف على ترخيص الجهاز وإدخاله في الخدمة.■

الهند

فيما يتعلق بالبحث والتطوير والتمويل والمساهمة عموماً في مجال علوم البلازما والاندماج، يتمحور تركيز الهندي الرئيسي حول مشروع إيتير. وتشغِّل الهند عدة أجهزة بحثية تجريبية وتعمل حالياً على وضع خريطة طريق في مجال الاندماج للسنوات الخمس والعشرين المقبلة، بما يشمل خططاً لتطوير مرفقين جديدين قبل إطلاق محطة قوى الاندماج الإيضاحية الهندية في أواخر أربعينات هذا القرن. ويتألف أول هذين المرفقين من مصدر نيوتروني اندماجي قائم على جهاز توكاماك كروي، أما المرفق الثاني فيتألف من جهاز توكاماك تقليدي مصمم للعمل في وضع التشغيل في الحالة المستقرة، ويبلغ حجمه ثلثي حجم مفاعل إيتير تقريباً.■

جمهورية إيران الإسلامية

تشغِّل جمهورية إيران الإسلامية حالياً ثلاثة أجهزة توكاماك هي: جهاز التوكاماك Alvand، وجهاز التوكاماك Damavand، وجهاز التوكاماك IR-T15 وجميعها مخصصة لدراسة البلازما في ظروف تجريبية مختلفة.■

إسرائيل

تستضيف إسرائيل منذ عام 2019 شركة nT-Tao الخاصة العاملة في مجال الاندماج. وقد كشفت هذه الشركة عن جمعها تمويلاً بقيمة 32 مليون دولار،

وهي تعمل بنشاط على تطوير تكنولوجيا الستللاريتور لأغراض إنتاج الطاقة.■

اليابان

تشغِّل اليابان أكثر من 20 من أجهزة الاندماج التجريبية، وهي بذلك في طليعة الجهود الرامية إلى النهوض بالبحث والتطوير في مجال الاندماج. وتتوخى استراتيجية الاندماج اليابانية اتباع نهج متدرج إزاء التطبيق العملي لطاقة الاندماج. وتشمل مراحل هذا النهج مرحلة تصميم مفهوم المحطة الإيضاحية JA-DEMO والتطوير التكنولوجي الأساسي حتى عام 2025، ثم مرحلة التصميم الهندسي والتطوير التكنولوجي الكامل بين عامي 2025 و2035، واتخاذ قرار بشأن الانتقال إلى تشييد المحطة بعد عام 2035 بحسب التقدم المحرز في مشروع إيتير.

وبالإضافة إلى ذلك، يركز التعاون الثنائي بين اليابان والاتحاد الأوروبي في إطار اتفاق النهج الموسَّع على ما يلي: '1' تصميم المحطات وأنشطة البحث والتطوير، '2' مشروع[2] للتحقق الهندسي والتصميم الهندسي لمرافق تشعيع مواد الاندماج؛ '3' استغلال جهاز التوكاماك JT-60SA الذي بدأ تشغيله في نهاية عام 2023. وهناك أيضاً العديد من الجهود الجارية في مجال البحوث الأكاديمية في الجامعات والمعاهد المتخصصة باستخدام الأجهزة البحثية والمرافق الخاصة بنظم الليزر العالية الطاقة.■

تصور لمنظر جوي لمرفق البحوث الشاملة في مجال تكنولوجيا الاندماج في هيفاي بمقاطعة آنهوي، الصين (الصورة مهداة من معاهد هيفاي للعلوم الفيزيائية التابعة للأكاديمية الصينية للعلوم، الصين).

[2] يُعرف هذا المشروع أيضاً باسم مشروع أنشطة التحقق الهندسي والتصميم الهندسي لمرفق IFMIF (مشروع IFMIF/EVEDA)، والهدف منه هو التحقق من مفهوم مرفق المصدر النيوتروني الموجه الخاص بالمحطة الإيضاحية IFMIF DEMO (مرفق IFMIF–DONES) الجاري تشييده في إسبانيا. وفي إطار أنشطة مشروع IFMIF/EVEDA، تم تشييد ثلاثة مرافق نموذجية أولية بهدف التحقق من كل مكون من المكونات الرئيسية الثلاثة لمرفق IFMIF-DONES. وأول هذه المرافق هو مرفق الاختبارات في كارلسروه بألمانيا، وتُختبر فيه المفاهيم الخاصة بوحدة اختبار التدفق العالي في مرفق IFMIF-DONES. والمرفق الثاني هو مرفق مستهدفات الليثيوم في أوراي باليابان، ويعمل على اختبار المفاهيم الخاصة بستارة الليثيوم السائل في مرفق IFMIF-DONES. والمرفق الثالث والأخير هو مرفق المعجل في روكاشو باليابان، ويعمل على اختبار المفاهيم لمعجل جسيمات حزم الديوتيريوم في مرفق IFMIF–DONES.

لبنان

تركز البحوث الأكاديمية في لبنان على إحراز تقدم في بعض الجوانب البالغة الأهمية في علوم الاندماج، بما في ذلك اضطراب البلازما، والاحتواء، وتطوير نظم التشخيص، ومفاهيم المحرِّفات.■

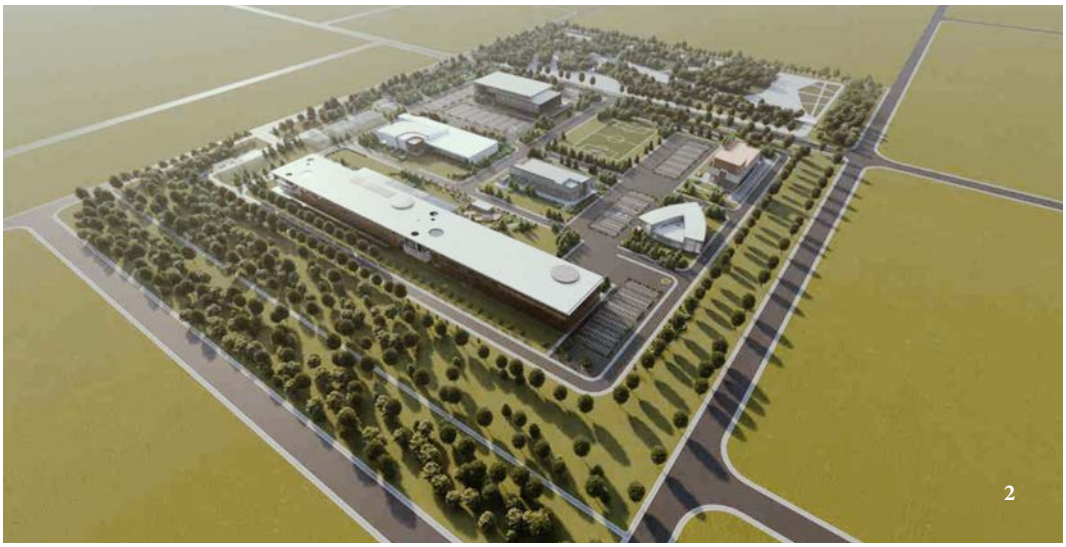
باكستان

تشغِّل باكستان حالياً مرفقي توكاماك، هما جهاز التوكاماك GLAST-III وجهاز التوكاماك MT-I، ولديها مرفق ثالث قيد التشييد هو جهاز التوكاماك MT-2، فضلا عن مرفق رابع ما زال في مرحلة التخطيط وهو جهاز التوكاماك PST [80]. وتهدف هذه الجهود المتضافرة إلى تحسين قدرات باكستان في مجال طاقة الاندماج.■

جمهورية كوريا

وضعت جمهورية كوريا خريطة طريق للاندماج تهدف إلى تشييد محطة قوى اندماج إيضاحية باسم K-DEMO بحلول عام 2050. وتنطوي خريطة الطريق الكورية على الاضطلاع بأنشطة التصميم المفاهيمي حتى عام 2030، ثم أنشطة التصميم الهندسي بين عامي 2031 و2035. وتدعم هذه الجهود مجموعة من أحدث أنشطة البحث والتطوير في مرفق التوكاماك KSTAR ومرفق التوكاماك VEST، بهدف إرساء قاعدة من العلوم والتكنولوجيات الأساسية بحلول عام 2035. وبالإضافة إلى ذلك، تنظر جمهورية كوريا في مشروع إنشاء مرفق جديد باسم "مجمَّع اختبارات هندسة الاندماج المتقدمة". والغرض من هذا المرفق هو الوفاء بمتطلبات تقييم أداء دثار التوليد في المحطات الاندماجية، بما يشمل التشغيل المستمر الطويل الأجل، والتدفق النيوتروني العالي الناتج عن الاندماج، واستخدام مستهدفات كبيرة الحجم لتشعيع وحدة توليد التريتيوم [81]. وسيشمل المجمع ما يلي:

- مرفق متكامل لاختبار التوليد باستخدام نظام قائم على معجل ديوتيرونات بطاقة تبلغ 40 مليون إلكترون فلط قادر على توليد تيار من النيوترونات بحد أقصى 10 ملي أمبير لمحاكاة الاندماج، ولهذا المرفق دور محوري في اختبار مكونات الدثار؛
- مرفق لاختبار نُظُم الدثار، يهدف إلى إيضاح موثوقية وأمان الدثار ونظمه الفرعية؛
- مرفق تجريبي لدورة الوقود، يهدف إلى التحقق من التشغيل المستمر لدورة الوقود باستخدام تبادل الهيدروجين والديوتيريوم H_2/D_2 على نطاق تجريبي بمقياس 1:10 مقارنة بالنطاق الكامل.■



المملكة العربية السعودية

تستثمر المملكة العربية السعودية في البحث والتطوير في مجال تكنولوجيات الطاقة المتقدمة، بما في ذلك تكنولوجيا الاندماج. وفي إطار هذه الاستراتيجية، استثمر صندوق جيمكو للتكنولوجيا في شركتي General Fusion وCFS.■

سنغافورة

أفيد بأن شركة Temasek Holdings Limited وهي شركة استثمارية في سنغافورة على ملك حكومة سنغافورة قد استثمرت في شركة CFS [82].■

تايلند

في عام 2023، بدأت تايلند، بالتعاون مع الصين، تشغيل أول جهاز توكاماك خاص بها وهو مرفق التوكاماك TT-1 [83]. ويوفر هذا المرفق أول جهاز توكاماك في جنوب شرق آسيا، ومن ثم يمثل عنصراً أساسياً في النهوض بالبحث والتطوير في مجال الاندماج في تايلند والبلدان المجاورة. ويبشر هذا المرفق بأن يكون أداة تعلم قيمة للغاية في مجالي بلازما الانماج والتطوير الهندسي [84].■

تقود عدة بلدان مبادرة تهدف إلى إنشاء الهيئة العربية للطاقة الاندماجية، لتكون جهة مركزية لتنسيق البحوث والأنشطة التعاونية في مجال الاندماج في المنطقة، وتوفير التمويل لمشاريع طاقة الاندماج في المستقبل، وضمان مشاركة هذه البلدان بنشاط في الجهود المبذولة على الصعيد العالمي في مجال طاقة الاندماج.

1 إطلاق جهاز التوكاماك TT-1 رسمياً في تايلند (الصورة مهداة من معاهد هيفاي للعلوم الفيزيائية التابعة للأكاديمية الصينية للعلوم، الصين).

2 تصور للمرفق الكوري المقترح إنشاؤه باسم مجمَّع اختبارات هندسة الاندماج المتقدمة (الصورة مهداة من المعهد الكوري لطاقة الاندماج، جمهورية كوريا).

صورة داخلية لوعاء البلازما الخاص بجهاز الستللاريتور W7-X
(الصورة مهداة من معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما، ألمانيا).

أوروبا

اتحاد EUROfusion وشبكة FuseNet ومنظمة Fusion for Energy ومرفق IFMIF–DONES

اتحاد EUROfusion هو تحالف أوروبي[3] يهدف إلى تنسيق وتمويل البحث والتطوير في مجال الاندماج في جميع أنحاء أوروبا. وقد وضع الاتحاد خريطة طريق قائمة على المعالم المرحلية البارزة، تحدد الأهداف المطلوب تحقيقها في الأجل القصير والمتوسط والطويل [85]. وتركز خريطة الطريق في البداية على المساهمة في مشروع إيتير. ويتحول التركيز بعد ذلك إلى المحطة الإيضاحية EU-DEMO، التي يُتوقع أن يبدأ تشغيلها بحلول عام 2050.

وتتمحور الأهداف في الأجل القصير حول أنشطة البحث والتطوير وأعمال التشييد في مفاعل إيتير ومرافق اختبار المواد مثل مرفق IFMIF–DONES، ومواصلة التصميم المفاهيمي للمحطة الإيضاحية EU-DEMO. ويتحول التركيز في الأجل المتوسط إلى الاستغلال العلمي والتكنولوجي لمفاعل إيتير ومرفق IFMIF-DONES، وبدء مرحلة التصميم الهندسي للمحطة الإيضاحية EU-DEMO بمشاركة قطاع الصناعة. وتشمل الرؤية الطويلة الأجل تصميم المحطة الإيضاحية EU-DEMO وتشييدها وتشغيلها، مع تكثيف التعاون مع قطاع الصناعة.■

وتؤدي الشبكة الأوروبية للتعليم في مجال الاندماج، أو شبكة FuseNet، دور حلقة الوصل المركزية في هذا المجال من خلال برامجها المعنية بالتنمية التعليمية والانتقال بين المراحل التعليمية المختلفة. والشبكة منظمة تابعة لاتحاد EUROfusion، وهي مكلفة بتعزيز وتنسيق الأنشطة التعليمية التي تدعم خريطة الطريق الخاصة بالاتحاد. وتشمل المبادرات التي أطلقتها شبكة FuseNet مخططات تمويل لفائدة طلاب الماجستير، وأنشطة لإقامة العلاقات المهنية لفائدة طلاب الدكتوراه، وإعداد المواد التعليمية وتنظيم الفعاليات لفائدة الطلاب في المراحل التعليمية الأصغر سناً. وبالإضافة إلى ذلك، تعمل شبكة FuseNet على تعزيز العلاقات مع قطاع الصناعة، لضمان توافق الجهود التعليمية مع الاحتياجات والتقدم المحرز في قطاع الاندماج.■

ومنظمة Fusion for Energy هي منظمة الاتحاد الأوروبي المعنية بإدارة مساهمات أوروبا في مشروع إيتير. وتتحمل أوروبا المسؤولية عن نصف المشروع تقريباً، في حين تتوزع المساهمات في بقية المشروع بالتساوي على الأعضاء الستة الآخرين (والاتحاد الروسي والصين وجمهورية كوريا والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان). وتعمل منظمة Fusion for Energy بالتعاون مع المنظمات الصناعية والبحثية الأوروبية من أجل تطوير وتصنيع المكونات التكنولوجية المتطورة التي ستوفرها أوروبا لمفاعل إيتير.■

وشهدت السنوات الأخيرة مشاركة كبيرة من مجموعة متعددة من شركات الخاصة في ألمانيا وإيطاليا والسويد وفرنسا وبلدان أخرى في تطوير تكنولوجيات الاندماج. ولضمان إمدادات الطاقة في أوروبا في الأجل الطويل، اتفقت عشر شركات أوروبية في حزيران/يونيه 2024 على إنشاء رابطة الاندماج الأوروبية [86]. وستجمع هذه الهيئة الموحدة بين مختلف الجهات المعنية في قطاع صناعة الاندماج والحكومات الوطنية، للتعجيل بإنتاج طاقة الاندماج على النطاق الصناعي. ■

3 البلدان المشاركة في اتحاد EUROfusion هي إسبانيا، وإستونيا، وألمانيا، وأوكرانيا، وآيرلندا، وإيطاليا، والبرتغال، وبلجيكا، وبلغاريا، وبولندا، والجمهورية التشيكية، والدانمرك، ورومانيا، وسلوفاكيا، وسلوفينيا، والسويد، وسويسرا، وفرنسا، وفنلندا، وكرواتيا، ولاتفيا، وليتوانيا، ومالطة، والمملكة المتحدة، والنرويج، والنمسا، وهنغاريا، وهولندا، واليونان.

1

ألمانيا

تؤدي ألمانيا دوراً رائداً في مجموعة متعددة من مجالات تطوير طاقة الاندماج، بما في ذلك البحوث المتعلقة بأجهزة الستللاريتور، وفيزياء أجهزة التوكاماك، وتكنولوجيات ومواد الاندماج، والتفاعلات بين البلازما وجدار الاحتواء. ويُعتبر جهاز W7-X الموجود في ألمانيا أكبر جهاز ستللاريتور في العالم. وهو مزود بملفات فائقة التوصيل مؤلفة من وحدات نمطية، مما يتيح تشغيله في حالة البلازما المستقرة لاستكشاف المنظومات المهمة لمحطات القوى.

وتعمل الحكومة الألمانية على التعجيل بجهود الاستغلال التجاري للاندماج، إدراكاً منها لزيادة عدد الشركات الخاصة التي تتخذ من ألمانيا مقراً لها وحرصاً على الاستفادة من مساهمات تلك الشركات والتواصل معها. وأنشأت مجموعة من الشركات الألمانية العاملة في قطاع طاقة الاندماج رابطة Pro-Fusion لدعم قطاع صناعة الاندماج [87]. وستكون هذه الرابطة نقطة انطلاق للمساهمة في إرساء المنظومة الاقتصادية للاندماج، والعمل في الأجل الطويل على تشكيل الرأي العام بشأن طاقة الاندماج.■

إيطاليا

لدى إيطاليا برنامج نشط في مجال الاندماج. ومرفق DTT مشروع إيطالي جديد في مجال الاندماج يُتوقع بدء تشغيله بعد عام 2025. ويتألف اتحاد DDT من العديد من المؤسسات البحثية الإيطالية والشركاء الحكوميين والإقليميين والجهات المعنية الدولية والشركات الخاصة. وقد جمع الاتحاد قرابة 500 مليون يورو لتشييد المرفق. وتستضيف إيطاليا أيضاً عدة مرافق تجريبية خاصة ببحوث الاندماج وتشارك بنشاط في التحضير لعمليات تشغيل مفاعل إيتير وتصميم المحطة الإيضاحية EU-DEMO. وقد أبرمت قطاعات الصناعة الإيطالية عقوداً بقيمة تجاوزت 1,8 مليار يورو من أجل تطوير تكنولوجيات الاندماج.■

فرنسا

تستضيف فرنسا مفاعل إيتير وعدة أجهزة اندماج بحثية أخرى، بما في ذلك جهاز التوكاماك WEST ومرافق متعددة قائمة على الليزر. وتوجد في فرنسا أيضاً الشركة الناشئة Renaissance Fusion - وهي شركة تعمل على تطوير مفهوم ستللاريتور قائم على مغناطيسات HTS وبطانة داخلية سائلة. وبغية دعم البحث والتطوير في هذا المجال، تعمل الحكومة الفرنسية على استكشاف أطر لتحفيز الشراكات بين القطاعين العام والخاص.■

كازاخستان

تشمل أنشطة بحوث الاندماج الجارية في كازاخستان مجموعة من المبادرات، بدءاً من منصات اختبار صغيرة تركز على البلازما المنخفضة الحرارة، ووصولاً إلى اختبارات واسعة النطاق لبحوث الاندماج مثل جهاز التوكاماك KTM وتطبيقات المعجلات لأغراض بحوث الاندماج. ولدى كازاخستان اتفاق تعاوني

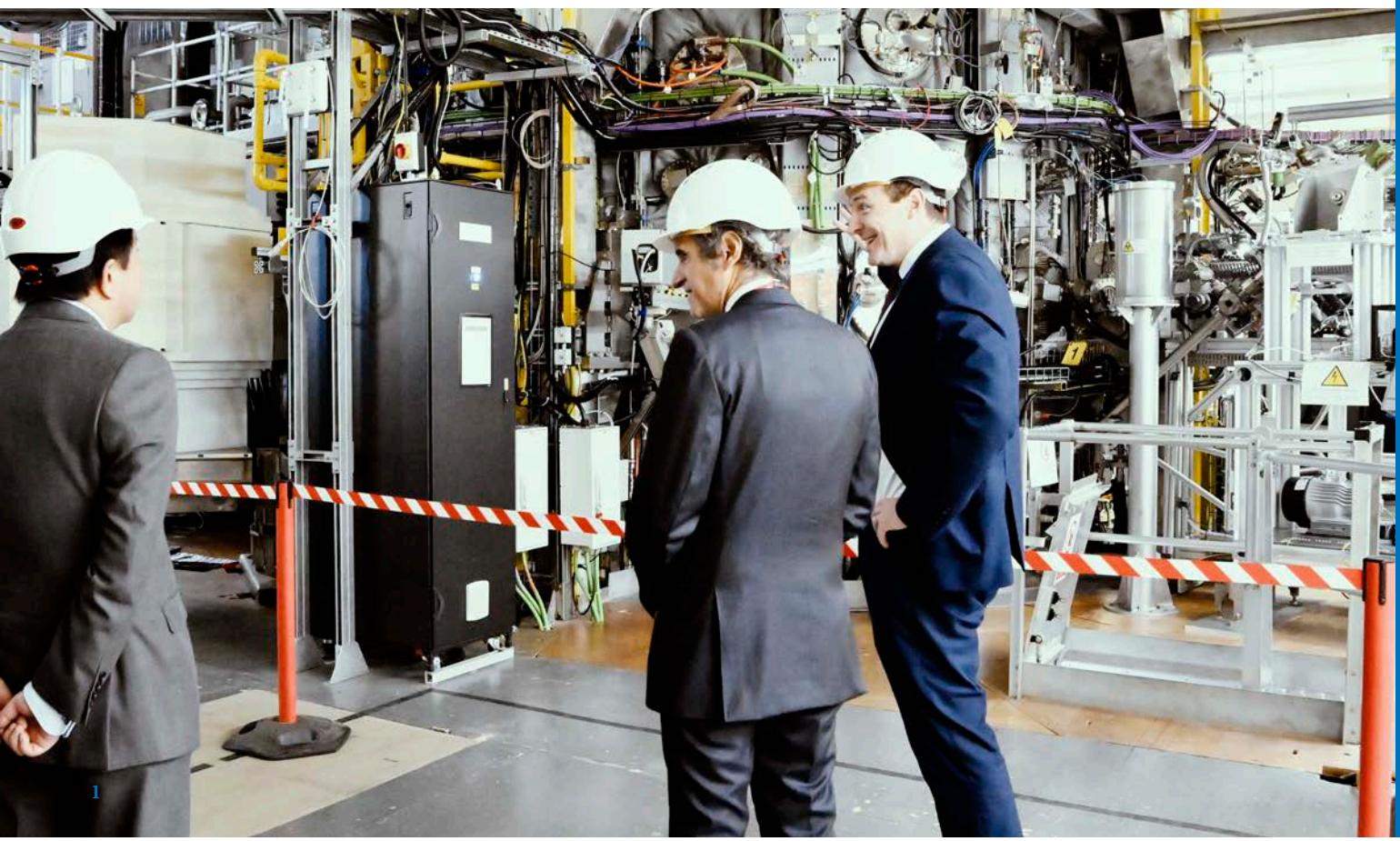
قائم مع مفاعل إيتير لدراسة المقاومة الإشعاعية لعمليات تشخيص البلازما وجودة المواد الهيكلية. وبالإضافة إلى ذلك، أبرمت كازاخستان شراكة مع كل من الاتحاد الروسي وبيلاروس وطاجيكستان وقيرغيزستان للاستخدام المشترك لجهاز التوكاماك KTM، ومن ثم تعزيز جهود البحث والتطوير في المنطقة.■

الاتحاد الروسي

في الاتحاد الروسي، يُضطلع بأنشطة تطوير طاقة الاندماج وفقاً للاستراتيجية الوطنية للطاقة الذرية التي تركز على الأجهزة القائمة على الاندماج الخالص ومفاعلات الاندماج-الانشطار المختلطة. ومن بين المشاركين الرئيسيين في هذه المبادرة الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم"، ووزارة العلوم والتعليم العالي (بما في ذلك أكاديمية العلوم الروسية)، ومعهد كورشاتوف، والمركز الوطني للبحوث. وتركز الجهود البحثية على أجهزة التوكاماك، والنظم القائمة هلى الليزر، ونظم الاندماج–الانشطار المختلطة. ويُعتبر هذا النوع الأخير ذا أهمية استراتيجية لتشغيل المفاعلات النووية ومحطات الاندماج في الاتحاد الروسي في المستقبل.■

1 مرفق IFMIF-DONES هو مرفق لاختبار المواد، قيد التشييد في غرناطة بإسبانيا. وتقود المشروع إسبانيا وكرواتيا، حيث تمول إسبانيا 50% من جميع تكاليف التشييد و 10% من تكاليف التشغيل، في حين تتحمل كرواتيا 5% من تكاليف التشييد و 5% من تكاليف التشغيل. وسيستخدم مرفق IFMIF-DONES معجل جسيمات لإنتاج حزمة ديوترونات ذات موجة متواصلة توَّجه إلى مستهدف مصنوع من ستارة من الليثيوم السائل. وسيؤدي التفاعل بين الديوتيريوم والليثيوم إلى إنتاج ما يكفي من النيوترونات الحرة لمحاكاة التدفق النيوتروني المتوقع إنتاجه مع مرور الوقت في المحطة الإيضاحية EU-DEMO. وخلف مستهدف الليثيوم مباشرة، ستُركَّب الوحدة النمطية لاختبار التدفق العالي والتي ستحتوي على كبسولات من عينات المواد لاختبار تأثرها بالتشعيع النيوتروني [88].

2 المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي خلال الزيارة التي أجراها إلى مرفق اختبار المناولة عن بعد والروبوطيات في كولهام بالمملكة المتحدة.



المملكة المتحدة

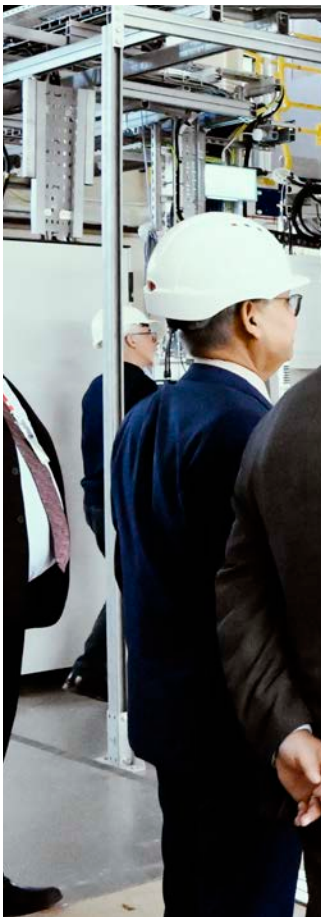
هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة هي المنظمة الوطنية المسؤولة عن بحوث الاندماج وتنفيذ مشاريع طاقة الاندماج. وتشرف الهيئة على أعمال شركة UK Industrial Fusion Solutions المسؤولة عن تنفيذ النموذج الأولي لمحطة STEP الاندماجية. وبالإضافة إلى ذلك، تنفذ الهيئة برنامج Fusion Futures لدعم استراتيجية المملكة المتحدة في مجال الاندماج. ويشمل البرنامج إنشاء مرافق جديدة في مجمَّع كولهام التابع للهيئة في جنوب إنكلترا بهدف النهوض بالتكنولوجيات الجديدة والتوسع في القدرات المتعلقة بدورة وقود الاندماج. ويهدف برنامج Fusion Futures إلى تعزيز الابتكار الريادي على الصعيد العالمي وتحفيز قدرات قطاع الصناعة عموماً من خلال التعاون الدولي وتطوير محطات القوى الاندماجية في المستقبل. وبالإضافة إلى ذلك، يجري العمل على إرساء حزمة من المهارات المتعلقة بالاندماج لتعزيز الخبرات على نطاق طائفة من التخصصات والمستويات.

وفي عام 2021، افتتحت الهيئة مرفق تكنولوجيا الاندماج [89] بالقرب من روذرام في جنوب يوركشاير لتطوير واختبار المواد والمكونات للاستخدام في محطات القوى الاندماجية في المستقبل. وتتعاون الهيئة أيضاً مع الأوساط الأكاديمية والمؤسسات البحثية الأخرى ومع سلسلة الإمداد الصناعية في مجالات مختلفة، بما في ذلك الروبوطيات والمواد.

وتشمل أجهزة الاندماج التابعة للهيئة جهاز التوكاماك المحدَّث MAST وجهاز التوكاماك JET. وقد اختتم جهاز التوكاماك JET عمليات البلازما في نهاية كانون الأول/ديسمبر 2023، وتشرف الهيئة حالياً على مشروع إخراجه من الخدمة وإعادة استخدامه بعد تغيير غرضه [90]. وهذا المشروع هو الأول من نوعه في العالم وسوف يسهم بمعارف علمية وهندسية في تطوير أجهزة ومحطات القوى الاندماجية في المستقبل. وتشمل أنشطة المشروع تفكيك جهاز التوكاماك JET باستخدام نظم روبوطية، وإجراء بحوث بشأن استعادة التريتيوم لإعادة استخدامه كوقود للاندماج، ومواصلة أعمال التطوير في مجمَّع كولهام التابع للهيئة. ■

1 المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي خلال الزيارة التي أجراها إلى موقع جهاز التوكاماك المحدَّث MAST.

2 وقع الاتفاق بين الوكالة وحكومة شيلي السيد لويس هويرتا من لجنة الطاقة النووية الشيلية وشهده وكيل وزارة الطاقة في شيلي السيد لويس فيليبي راموس.



أمريكا اللاتينية والكاريبي

الأرجنتين والبرازيل وبيرو وشيلي وكوستاريكا والمكسيك

يُلاحظ الاتجاه العالمي نحو زيادة أنشطة الاندماج في العديد من بلدان أمريكا اللاتينية، بما في ذلك الأرجنتين والبرازيل وبيرو وشيلي وكوستاريكا والمكسيك. ولتعزيز القدرات الإقليمية في مجال فيزياء الاندماج والبلازما، تتركز الجهود على النهوض بالبحوث، وإقامة علاقات تعاون من خلال التجارب المشتركة، وتوفير فرص التدريب الداخلي للباحثين، وتنسيق البرامج، وعقد الدورات الدراسية الصيفية المخصصة لفيزياء البلازما وعلوم وتكنولوجيا الاندماج.

وبالتعاون مع مختبر برينستون لفيزياء البلازما، أطلقت الوكالة في عام 2024 سلسلة جديدة من الحلقات الدراسية الشبكية لتسليط الضوء على التقدم والتطورات الراهنة في أنشطة علوم الاندماج والبلازما في أمريكا اللاتينية.

وفي أيار/مايو 2024، وقعت الوكالة وحكومة شيلي اتفاقاً لتعزيز التعاون بشأن التكنولوجيا النووية والليثيوم [91]. ويهدف هذا الاتفاق إلى تسخير التكنولوجيا النووية لتعزيز أنشطة تعدين الليثيوم وتمهيد الطريق أمام توسيع نطاق الدعم الإقليمي المقدم من الوكالة. وتشمل تطبيقات الليثيوم قطاع الاندماج ومجموعة أخرى من قطاعات الطاقة.

وفي حزيران/يونيه 2024، وقعت الوكالة وحكومة بيرو إعلانا مشتركا بشأن التعاون في مجال تطبيقات التكنولوجيا النووية في صناعة التعدين لمساعدة بيرو على حماية البيئة من خلال تمكينها من تعدين الليثيوم واستكشافه بطريقة مستدامة [92].■

3 المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي يوقع اتفاقا مع وزير خارجية بيرو، السيد خافيير غونزاليس-أولايتشيا، خلال زيارته إلى بيرو في حزيران/يونيه 2024.

الحلقات الدراسية الشبكية التي نظمتها الوكالة بشأن أنشطة الاندماج في أمريكا اللاتينية

أمريكا الشمالية

الولايات المتحدة

تستثمر وزارة الطاقة الأمريكية في بحوث الاندماج منذ عقود من خلال برنامج علوم طاقة الاندماج التابع لمكتب العلوم بالوزارة. وتشمل هذه الجهود دعم أنشطة التعاون الدولي مثل مفاعل إيتير، وبرنامج الاندماج القائم على الاحتجاز بالقصور الذاتي التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي. وفي الآونة الأخيرة، تستهدف وكالة مشاريع البحوث المتقدمة في مجال الطاقة (المعروفة باسم وكالة ARPA-E) مجالات البحث والتطوير التي يمكن أن تؤدي إلى تحقيق نقلة نوعية في مجال الاندماج، مع التركيز على تحقيق الاستغلال التجاري للاندماج في الوقت المناسب. ويركز برنامج وزارة الطاقة في مجال الاندماج الآن على الربط بين بحوث الاندماج الأساسية والبحوث التطبيقية لتلبية احتياجات قطاع صناعة الاندماج الآخذ في النمو في الولايات المتحدة. وتستضيف الولايات المتحدة الأمريكية أكبر عدد من شركات طاقة الاندماج (25 شركة إجمالاً)، بما في ذلك العديد من الشركات الكبرى في هذا المجال. وبالإضافة إلى ذلك، تستضيف الولايات المتحدة الأمريكية أكبر عدد من أجهزة الاندماج سواء قيد التشغيل أو قيد الإنشاء أو قيد التطوير (أكثر من 40 جهازاً). وفي هذا السياق، تعمل وزارة الطاقة حالياً على تنسيق مجموعة واسعة من الأنشطة الجديدة لدعم الاستغلال التجاري للاندماج في نهاية المطاف. ويشمل ذلك برنامج تطوير الاندماج القائم على المعالم المرحلية البارزة [93]، والأنشطة الدولية لتعزيز أمن الطاقة والقيادة التكنولوجية [94] ومجموعة مختلفة من الجهود الحكومية المشتركة بين الوكالات [95] لتقييم مشهد المنافسة الدولية وتطوير السوق، ووضع الأطر الرقابية المناسبة، وإنشاء سلاسل الإمداد، وضمان تنمية القوى العاملة بطريقة شاملة للجميع، وضمان عدالة الطاقة والعدالة البيئية، وضمان وجود مسارات قابلة للتطبيق للتخلص من النفايات وإعادة تدويرها، وضمان إشراك الجمهور.■

كندا

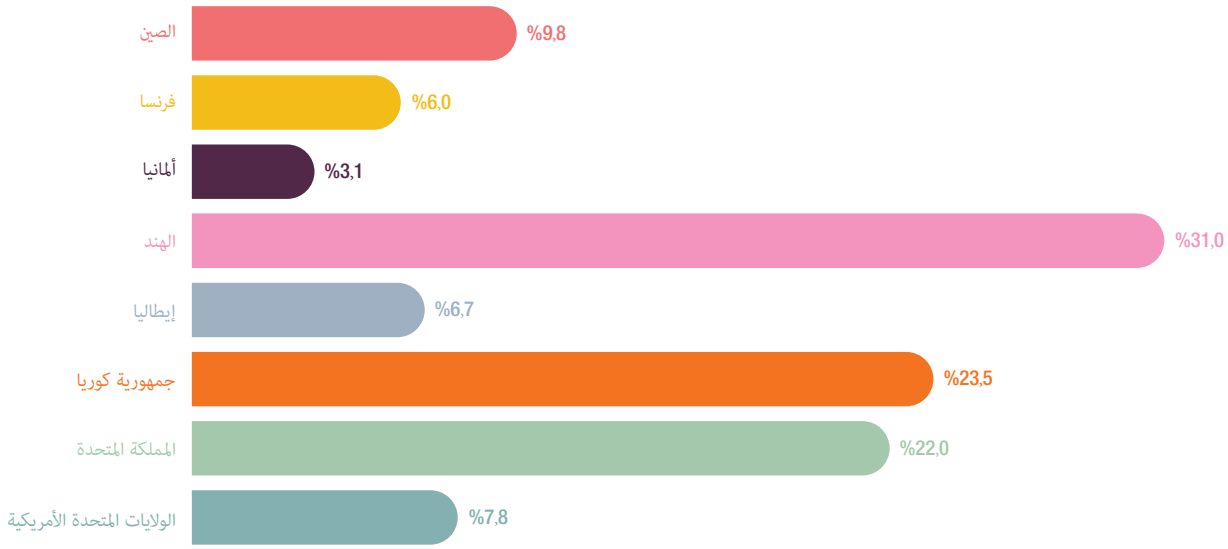
تتمتع كندا بخبرات كبيرة في المجالات الرئيسية اللازمة لتطوير قطاع صناعة ناضج في مجال الاندماج، مثل إنتاج الديوتيريوم والتريتيوم والتعامل معهما، والروبوطيات، والمناولة عن بعد، وعلوم المواد. ويمكن الاستفادة من هذه القدرات لدعم تطوير الاندماج بالنظر إلى توافقها مع احتياجات تكنولوجيات الاندماج. ورغم نقاط القوة المذكورة، فإن الدعم الحكومي للبحث والتطوير في مجال الاندماج في كندا متوسط المستوى، حيث تضطلع المؤسسات الأكاديمية والشركات الخاصة بالأنشطة الحالية في المقام الأول.

وقادت المختبرات النووية الكندية إعداد تقرير بعنوان Fusion Energy for Canada (تسخير طاقة الاندماج من أجل كندا) [48]. ويحثُّ هذا التقرير الحكومة الكندية على وضع سياسة واضحة وتكليف محدد لحشد الجهود من أجل إرساء منظومة للاندماج. ورداً على ذلك، أعلنت المختبرات النووية الكندية أنها ستفتح عملية الدعوة الخاصة بالمفاعلات النمطية الصغيرة لتشمل النماذج الأولية للمحطات الاندماجية [50]. كذلك وسعت المختبرات النووية الكندية برنامج مبادرة البحوث النووية الكندية لزيادة التركيز على البحث والتطوير في مجال الاندماج، وتعزيز المشاريع التعاونية مع بائعي المفاعلات النووية المتقدمة.■

المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي يزور مختبر برينستون لفيزياء البلازما في الولايات المتحدة الأمريكية في أيلول/سبتمبر 2024.

الاندماج
أرقام

في



معدل النمو المركب الإيجابي لعدد الأوراق البحثية المقدمة في مؤتمر طاقة الاندماج بحسب البلد الذي ينتمي إليه مؤلف الورقة الرئيسي (2006-2023) على مدى السنوات السبع عشرة الماضية، شهدت جمهورية كوريا والمملكة المتحدة والهند أسرع معدلات الزيادة في إجمالي عدد الأوراق البحثية التي ينتمي مؤلفوها الرئيسيون إلى هذه البلدان، مما يشير إلى زيادة مشاركتها في التعاون الدولي. وتسلط هذه الزيادة في المساهمات الضوء على الدور الحيوي للتعاون العالمي في التعجيل بالتقدم نحو طاقة الاندماج، حيث يؤدي تقاسم الخبرات وبذل الجهود الجماعية إلى دفع عجلة الابتكار والنهوض بالإنجازات العلمية.

طاقة الاندماج في عام 2024: لمحة سريعة

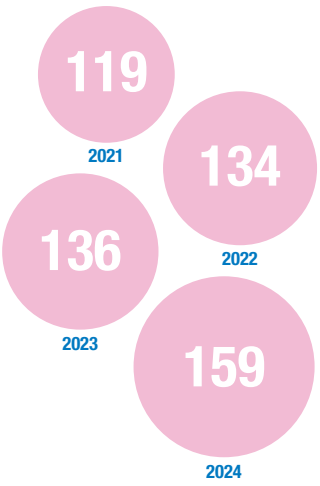
بين عامي 2021 و2024، شهد قطاع طاقة الاندماج نمواً كبيراً وزيادة ملحوظة في التنوع. وارتفع العدد الإجمالي لمشاريع الاندماج، مع زيادة ملحوظة في تصاميم الاحتواء البديلة والقائمة على القصور الذاتي وعلى أجهزة ستللاريتور، مما يسلط الضوء على التحول نحو استكشاف تكنولوجيات متنوعة تتجاوز أجهزة التوكاماك التقليدية.

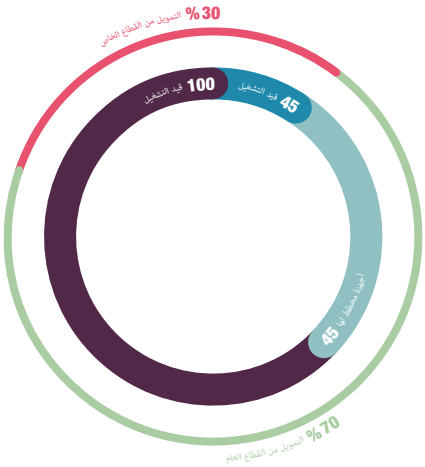
وفي عام 2024، هناك توزيع أكثر إنصافاً بين المشاريع التجريبية والمحطات الاندماجية، مما يشير إلى أن المجال قد بلغ مستوى من النضج. وشهد القطاع أيضاً ارتفاعاً كبيراً في عدد المشاريع المخطط لها، مما يشير إلى وجود حالة تخطيط استراتيجي طويل الأجل. وبالإضافة إلى ذلك، فقد زادت مشاركة القطاع الخاص بواقع الضعف تقريباً، مما يدل على زيادة الاهتمام التجاري والاستثمار، وبذلك يؤدي القطاع الخاص دوراً مكملاً للدعم القوي المستمر الذي يقدمه القطاع العام.

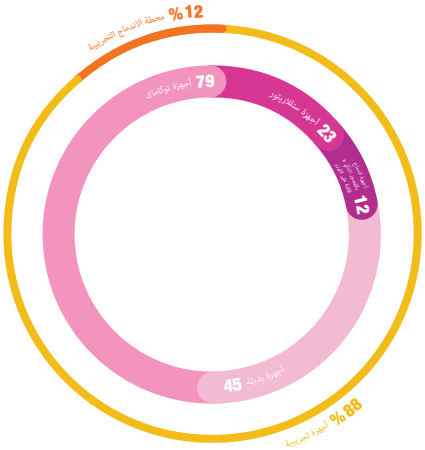
ويمثل عام 2024 مرحلة ديناميكية في مسار طاقة الاندماج تتميز بالتنوع التكنولوجي والتخطيط الاستراتيجي والدفع المعزز نحو التعاون بين القطاعين العام والخاص.■

زيادة الاستثمار وتنوع النهج التكنولوجية

تشير الاتجاهات الأخيرة في قطاع طاقة الاندماج إلى مستقبل واعد يتميز بسرعة التقدم التكنولوجي، وزيادة الاستثمار، والقبول على نطاق أوسع. ويشير التنوع الذي يشهده مجال الاندماج، كما يتجلى في تصاميم الاندماج البديلة والارتفاع الكبير في المشاريع القائمة على الليزر وأجهزة ستللاريتور، إلى أنه يجري استكشاف مسارات تكنولوجية مختلفة لتحقيق طاقة اندماج







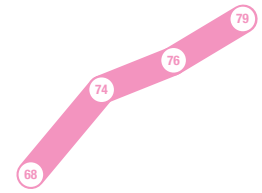
في عام 2024، كانت معظم أجهزة الاندماج في طور التصاميم التجريبية (139 جهازا). وفي حين تظل أجهزة التوكاماك هي السائدة في عام 2024، فقد تزايد شيوع تصاميم الأجهزة الأخرى في السنوات الأخيرة.

لا يزال التمويل العام لأجهزة الاندماج ثابتاً في عام 2024، في حين زاد التمويل الخاص في مشاريع الاندماج بأكثر من الضعف منذ عام 2021. وحقق عدد أجهزة الاندماج قيد التشغيل رقماً قياسياً في عام 2024 بعد بدء تشغيل خمس أجهزة إضافية مقارنة بالعام السابق، ولا يزال هناك العديد من الأجهزة المخطط لها.

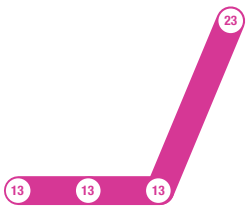
مع تزايد عدد مشاريع طاقة الاندماج عاماً بعد عام، يزداد أيضا الاهتمام المتزايد والاستثمار في قطاع طاقة الاندماج من جاني كيانات القطاعين العام والخاص.

مستدامة. ومن شأن هذا النهج القائم على التنوع أن يعزِّز بصورة كبيرة القدرة على تحقيق إنجازات علمية.

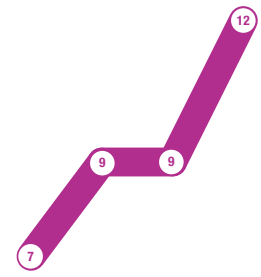
وسيكون للتعاون المستمر بين القطاعين العام والخاص دور حاسم الأهمية في التعجيل بالتطور التكنولوجي والتوسع في تطبيق النماذج التجريبية الناجحة وصولاً إلى إنشاء محطات اندماجية عاملة.■



أجهزة توكاماك



أجهزة ستللاريتور



أجهزة قائمة على الليزر/القصور الذاتي

أجهزة بديلة

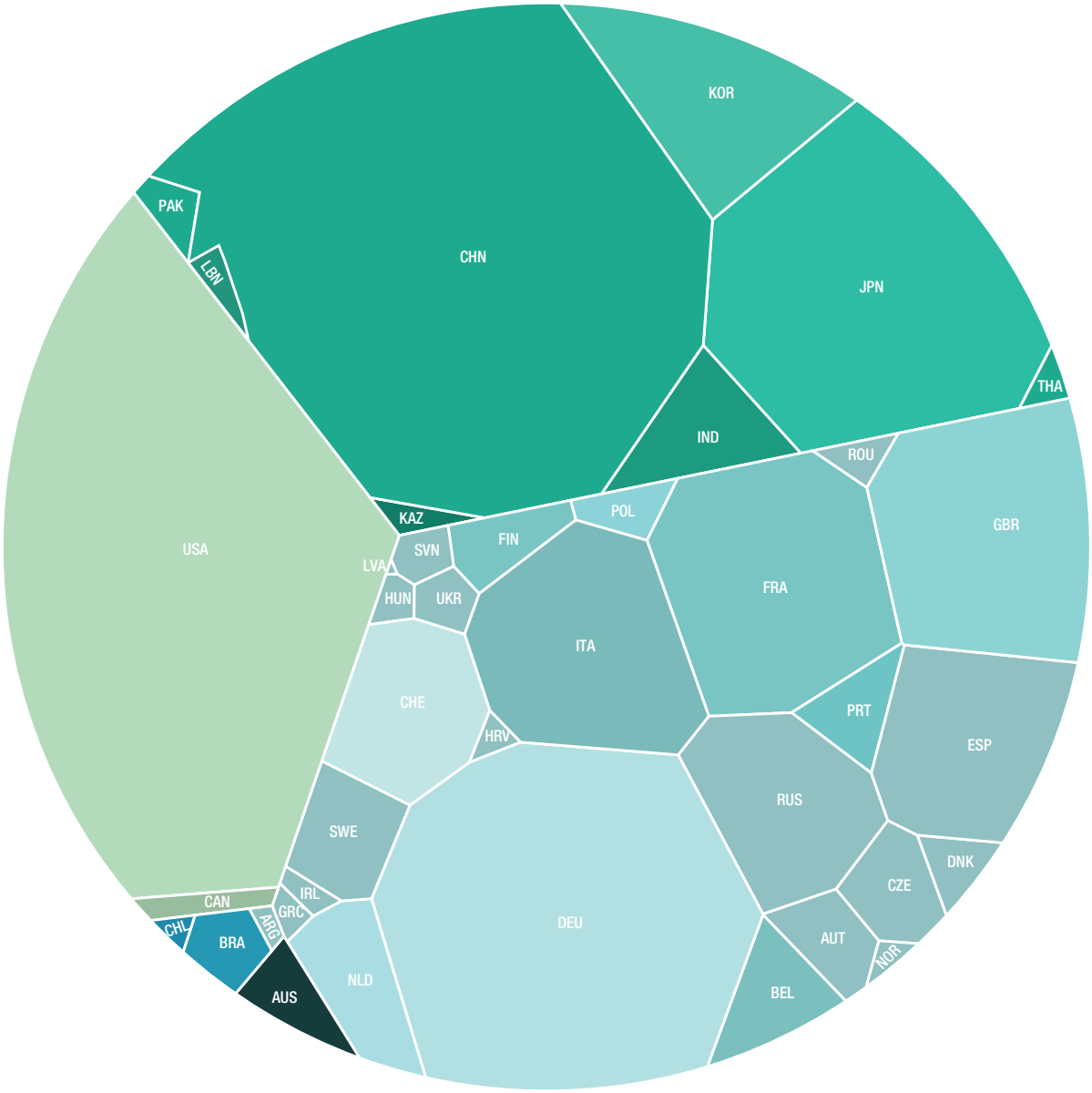
عدد أجهزة الاندماج سنوياً

الاتجاهات في بحوث طاقة الاندماج (2014-2023).

كانت بحوث طاقة الاندماج موضوع مساهمات كثيرة من بلدان في شتى أنحاء العالم على مدى العقد الماضي. ويُذكر أن العدد التراكمي للمقالات المقبولة في مجلة الاندماج النووي بين عامَي 2014 و2023 يسلط الضوء على الاهتمام المتزايد بهذا المجال وأوجه التقدم المحققة فيه.

وتعكس الاتجاهات الملاحظة هنا البيانات المتوافرة لأنها ترتبط مباشرةً بمضمون مجلة الاندماج النووي ولكنها لا تعكس بالضرورة الاتجاهات العالمية المتعلقة بأنشطة البحث والتطوير في مجال الاندماج.

وكان للصين على مدى السنوات السابقة أكبر عدد من المساهمات (858 مقالاً مقبولاً). ويشير ذلك إلى تركيز الصين الكبير على الاندماج في العقد الماضي. وتقدِّم بلدان أخرى مثل الولايات المتحدة (762 مقالاً) وألمانيا (447 مقالاً) مساهمات بارزة أيضاً، بدفع من الاستثمارات الكبيرة في مجال العلوم والتكنولوجيا. وإضافةً إلى ذلك، توجَد في بلدان كاليابان (346 مقالاً)، وفرنسا (200 مقال)، والمملكة المتحدة (196 مقالاً)، وإيطاليا (174 مقالاً)، وإسبانيا (129 مقالاً)، برامج بحثية قائمة منذ فترة طويلة أيضاً، وتُعَدُّ هذه البلدان من الجهات الفاعلة الرئيسية في ميدان البحوث الدولية. وإلى جانب الصين واليابان، تمثِّل جمهورية كوريا (129 مقالاً) مساهماً بارزاً آخر في آسيا، وهو ما يدل أيضاً على الدور المتنامي لهذه المنطقة في بحوث الاندماج. وتخطو الهند أيضاً (57 مقالاً) خطوات ملحوظة في هذا المجال. ولا يزال للاتحاد الروسي (115 مقالاً) حضور قوي في مشهد بحوث الاندماج. ويُذكر أن بلداناً مثل مملكة هولندا (47 مقالاً)، والسويد (43 مقالاً)، وبلجيكا (38 مقالاً)، والجمهورية التشيكية (36 مقالاً)، وأستراليا (13 مقالاً)، حافظت باستمرار على عدد مطرد من المساهمات، وبخاصة من خلال الشراكات الدولية وفي مجالات بحثية متخصصة ترتبط بطاقة الاندماج.



أكثر مقال استشهد به بين المقالات المنشورة منذ عام 2014

أكثر مقال تنزيلا بين المقالات المنشورة في عام 2024

أكثر مقال تنزيلا بين المقالات المنشورة منذ عام 2014

الاتجاهات العالمية في بحوث طاقة الاندماج وفقاً لعدد المقالات التي قُبل نشرها في مجلة الاندماج النووي (المقالات المقبولة في الفترة 2014-2023). والمساهمات الخاصة بمفاعل إيتير ومرفق الطارة الأوروبية المشتركة مدرجة ضمن المقالات الصادرة عن فرنسا والمملكة المتحدة على التوالي.

المراجع

[1] DEPARTMENT OF ENERGY, DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition (2022), https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-historyachieving-fusion-ignition

[2] EUROFUSION, Breaking New Ground: JET Tokamak's Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes (2024), https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/

[3] NORMILE, D., First plasma fired up at world's largest fusion reactor (2023), https://www.science.org/content/article/first-plasma-fired-world-s-largest-fusion-reactor3

[4] INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Reliable 403 Seconds Stationary H-mode Plasmas Demonstrated on EAST (2023), https://www. english.ipp.cas.cn/syxw/202304/t20230417_329393.html

[5] KREMEN, R., Fusion record set for tungsten tokamak WEST (2024), https://phys.org/news/202405--fusion-tungsten-tokamak-west.html

[6] DING, S., et al., A high-density and high-confinement tokamak plasma regime for fusion energy, Nature 629 (2024) 555–560 https://doi.org/10.1038/s415863-07313-024-

[7] SEO, J., et al., Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning, Nature 626 (2024) 746–751 https://doi.org/10.1038/s415869-07024-024-

[8] LEVITT, B. et al., Elevated Electron Temperature Coincident with Observed Fusion Reactions in a Sheared-Flow-Stabilized Z Pinch, Phys. Rev. Lett. 132 (2024), https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.155101

[9] KYOTO FUSIONEERING, [New Report] Advancing Fusion Technology: Insights and Collaboration Opportunities (2024), https://kyotofusioneering.com/en/news/20242421/26/06/

[10] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCE, ENGINEERING, AND MEDICINE, Bringing Fusion to the U.S. Grid, The National Academies Press, Washington, D.C. (2021), https://doi.org/10.1722625991/

[11] CHAPMAN, I., COWLEY, S., WILSON, H., Delivering fusion energy – The Spherical Tokamak for Energy Production (STEP), Phil. Trans. R. Soc. A 382 (2024), https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0416

[12] MIT ENERGY INITIATIVE, The Role of Fusion Energy in a Decarbonized Electricity System (2024), https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/202409//MITEI_FusionReport_091124_final_COMPLETE-REPORT_fordistribution.pdf

[13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Opens Fusion Energy Discussion at COP28 as Momentum Keeps Growing (2023), https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-opens-fusion-energy-discussion-at-cop28-as-momentum-keeps-growing

[14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA World Fusion Outlook 2023, Outlooks, IAEA, Vienna (2023), https://doi.org/10.61092/iaea.ehyw-jq1g

[15] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The global fusion industry in 2024 (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/20242024-/07/annual-global-fusion-industry-report.pdf

[16] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Fusion Industry Supply Chain: Opportunities and Challenges (2023), https://www. fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/202308//FIA-Supply-Chain-2023-FINAL.pdf

[17] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION, The European High-Level Roundtable on Fusion energy calls for closer collaboration between the public and the private sector (2024), https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/european-high-level-roundtable-fusion-energy-calls-closer-collaboration-between-public-and-private-202414-03-_en

[18] WORLD BANK, How Can Public-Private Partnerships (PPPs) be Successful? (2023), https://www.worldbank.org/en/region/mena/brief/how-can-public-private-partnerships-ppps-be-successful

[19] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs (2024), https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/energy-and-power/climate-smart-ppps-1

[20] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs: Further Reading and Resources (2024), https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/climate-smart-ppps-further-reading-and-resources

[21] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches Commercializing Fusion Energy Paper (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-commercializing-fusion-energy-paper/

[22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Device Information System (2024), https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx

[23] DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY (EUROPEAN COMMISSION), et al., Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy, Luxembourg, European Union (2024), https://data.europa.eu/doi/ 10.2833323326/

[24] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fact Sheet: Inflation Reduction Act Supporting the Future of DOE Science (2022), https://www.energy.gov/science/articles/fact-sheet-inflation-reduction-act-supporting-future-doe-science

[25] US DEPARTMENT OF THE TREASURY, U.S. Department of the Treasury, IRS Release Proposed Guidance to Continue Investment Boom in Clean Energy Production (2024), https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2376

[26] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Consultation on a new National Policy Statement for Fusion Energy (2024), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/667d5af197ea0c79abfe4d1a/new-nps-for-fusion-energy-consultation-document-1.pdf

[27] EUROPEAN COMMISSION, Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net Zero Industry Act), COM/2023161/ final (2023), https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN TXT/?uri=celex%3A52023PC0161

[28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, New IAEA Initiative to Enhance Fusion Energy Collaboration (2023), https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-initiative-to-enhance-fusion-energy-collaboration

[29] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Towards fusion energy: the UK fusion strategy: The next stage of the UK's fusion energy strategy (2023), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65301b78d06662000d1b7d0f/towards-fusion-energy-strategy-2023-update.pdf

[30] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UK launches search for industry partners to develop fusion plant (2024), https://www.gov.uk/government/news/uk-launches-search-for-industry-partners-to-develop-fusion-plant

[31] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement Between DOE and the UK Department for Energy Security and Net Zero Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion (2023), https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-uk-department-energy-security-and-net-zero-concerning

[32] THE WHITE HOUSE, International Partnerships in a New Era of Fusion Energy Development (2023), https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/202302/12//international-partnerships-in-a-new-era-of-fusion-energy-development/

[33] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement between DOE and the Japan Ministry of Education, Sports, Science and Technology Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion Energy Demonstration and Commercialization (2024), https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-japan-ministry-education-sports-science-and-technology

[34] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fusion Energy Strategy 2024 (2024), https://www.energy.gov/sites/default/files/202406-/fusion-energy-strategy-2024.pdf

[35] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Congress Increases U.S. Funding for Fusion Energy Sciences Research (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/congress-increases-u-s-funding-for-fusion-energy-sciences-research/

[36] REUTERS, Biden administration expands tax credits beyond wind, solar (2024), https://www.reuters.com/business/energy/biden-administration-expands-tax-credits-beyond-wind-solar-202429-05-/

[37] FEDERAL REGISTER, Department of Energy, Fusion Energy Public-Private Consortium Framework, 20242024) 12539-).

[38] COUNCIL FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION JAPAN, Fusion Energy Innovation Strategy (Provisional translation) (2024), https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf

[39] MOONSHOT RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM, Announcing Call for Proposals for Project Managers in Moonshot Goal 10 (2024), https://www.jst.go.jp/moonshot/en/application/202403/index.html

[40] THE WALL STREET JOURNAL, China Outspends the U.S. on Fusion in the Race for Energy's Holy Grail (2024), https://www.wsj.com/world/china/china-us-fusion-race-4452d3be

[41] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), https://www.bloomberg.com/news/articles/202402-01-/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company

[42] KOREA JOONGANG DAILY, Gov't to chase 'artificial sun' with $866 million investment in nuclear fusion reactor development (2024), https://koreajoongangdaily.joins.com/news/202424-07-/business/economy/Govt-to-chase-artificial-sun-with-866-million-investment-in-nuclear-fusion-reactor-development/2097463

[43] FUSION FOR ENERGY, Discussing the European fusion strategy (2024), https://fusionforenergy.europa.eu/news/discussing-the-european-fusion-strategy/

[44] GERMAN FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH, Förderprogramm Fusion 2040, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn (2024).

[45] ITALIAN MINISTRY OF ENVIRONMENT, Al MASE la prima riunione della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (2023), https://www.mase.gov.it/comunicati/al-mase-la-prima-riunione-della-piattaforma-nazionale-un-nucleare-sostenibile

[46] G7 ITALIA 2024, Apulia G7 Leaders' Communiqué (2024), https://www.g7italy.it/wp-content/uploads/Apulia-G7-Leaders-Communique.pdf

[47] REUTERS, Britain, Canada sign deal to collaborate on fusion energy (2024), https://www.reuters.com/business/energy/britain-canada-sign-deal-collaborate-fusion-energy-202414-02-/

[48] CANADIAN NUCLEAR LABORATORIES, It's Time for a Canadian Fusion Strategy (2024), https://www.cnl.ca/clean-energy/hydrogen-research/fusion-day-2024/

[49] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UKAEA and CNL partner to accelerate fusion energy development (2024), https://www.gov.uk/government/news/ukaea-and-cnl-

6469d2af33f0_3e7d472a-492d-4ad3-a74c-cd52e-243b68a%40unq.gbl.spaces%2F1728984672947%3Fcontext%3D%257B%2525-22contextType%2522%253A%2522chat%2522%257D

[62] ENI, Eni signs a new collaboration agreement with CFS to support development of fusion energy (2023), https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/202303//eni-signs-new-collaboration-agreement-with-cfs-development-fusion-energy.html

[63] REUTERS, OpenAI CEO Altman says at Davos future AI depends on energy breakthrough (2024), https://www.reuters.com/technology/openai-ceo-altman-says-davos-future-ai-depends-energy-breakthrough-202416-01-/

[64] HELION ENERGY, Helion announces world's first fusion energy purchase agreement with Microsoft (2024), https://www.helionenergy.com/articles/helion-announces-worlds-first-fusion-ppa-with-microsoft/

[65] COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS, Commonwealth Fusion Systems Raises $115 Million and Closes Series A Round to Commercialize Fusion Energy (2024), https://cfs.energy/news-and-media/close-series-a-round

[66] NIKKIEI ASIA, Honda-backed Israeli startup to use nuclear fusion to power EVs (2024), https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Honda-backed-Israeli-startup-to-use-nuclear-fusion-to-power-EVs

[67] PR NEWSWIRE, NT-Tao Raises $22M Series A to Ensure a Secure, Clean Energy Future with a Compact and Scalable Nuclear Fusion Solution (2023), https://www.prnewswire.com/il/news-releases/nt-tao-raises-22m-series-a-to-ensure-a-secure-clean-energy-future-with-a-compact-and-scalable-nuclear-fusion-solution-301735890.html

[68] REUTERS, Chinese EV maker Nio invests in nuclear fusion startup (2023), https://www.reuters.com/business/energy/chinese-ev-maker-nio-invests-nuclear-fusion-startup-202319-05-/

[69] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches 2024 Supply Chain Report (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-2024-supply-chain-report/

[70] WORLD NUCLEAR NEWS, British-Japanese partnership for fusion development (2023), https://world-nuclear-news.org/Articles/British-Japanese-partnership-for-fusion-developmen

[71] TOKAMAK ENERGY, Tokamak Energy and Furukawa Electric Group strengthen relationship to progress commercial fusion energy (2024), https://tokamakenergy.com/202311/01//tokamak-energy-and-furukawa-electric-group-strengthen-relationship-to-progress-commercial-fusion-energy/

[72] HELION, Helion and Nucor announce collaboration to deploy 500 MWe fusion power plant (2023), https://www.helionenergy.com/articles/helion-nucor-collaboration-to-deploy-500-mw-fusion-power-plant/

partner-to-accelerate-fusion-energy-development

[50] WORLD NUCLEAR NEWS, CNL announces programmes to speed fusion deployment (2024), https://world-nuclear-news.org/Articles/CNL-announces-programmes-to-speed-fusion-deploymen

[51] GENERAL FUSION, General fusion partners with Canadian Nuclear Laboratories to advance commercial power plant design (2024), https://generalfusion.com/post/general-fusion-partners-with-canadian-nuclear-laboratories-to-advance-commercial-power-plant-design/

[52] KYOTO FUSIONEERING, Kyoto Fusioneering and Canadian Nuclear Laboratories Launch Joint Venture, Fusion Fuel Cycles Inc. (2024), https://kyotofusioneering.com/en/news/20242337/22/05/

[53] FUSION ENERGY BASE, Equity Investments to Fusion Energy Companies 20102023- by Country (2024), https://www.fusionenergybase.com/article/equity-investments-to-fusion-energy-companies-20102023--by-country

[54] FUSION ENERGY BASE, Fusion Energy Base (2024), https://www.fusionenergybase.com/

[55] US CONGRESS, S.870 - A bill to authorize appropriations for the United States Fire Administration and firefighter assistance grant programs, to advance the benefits of nuclear energy, and for other purposes, https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/870/all-info

[56] PADILLA, A. The Fusion Energy Act of 2024, One pager (2024), https://www.padilla.senate.gov/wp-content/uploads/One-Pager-Fusion-Act.pdf

[57] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Consolidated Guidance About Materials Licenses, Preliminary Draft Report, Rep. NUREG-1556, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2024).

[58] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Agile Nations working group on fusion energy regulation: initial recommendations, Policy Paper (2023), https://www.gov.uk/government/publications/agile-nations-uk-japan-and-canada-joint-recommendations-on-fusion-energy/agile-nations-working-group-on-fusion-energy-regulation-initial-recommendations

[59] DEUTSCHER BUNDESTAG, Anhörung zum Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und Europa (2024), https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/10105041010504-

[60] MEXICO BUSINESS NEWS, Oil Industry Explores Viability of Nuclear Fusion (2023), https://mexicobusiness.news/oilandgas/news/oil-industry-explores-viability-nuclear-fusion

[61] RECHARGE, Can a fusion energy pioneer backed by Google and Goldman Sachs help oil giant Occidental suck carbon from the air? (2024), https://teams.microsoft.com/dl/launcher/launcher.html?url=%2F_%23%2Fl%2Fmessage%2F19%3A33617185-f6154-a58-9820-

southeast-asia-iaea-and-iter-support-school-in-thailand

[85] EUROFUSION, The EUROfusion Roadmap (2024), https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/

[86] GAUSS FUSION, Establishment of a European Fusion Association (2024), https://cdn.prod.website-files.com/6461f14c58e0282da166d83d/6669502d73c9e85f4d2af3e0_European%20Fusion%20Association_PM_EN%5B86%5D.pdf

[87] NUCNET, Companies Announce Formation Of Nuclear Fusion Industrial Association (2024), https://www.nucnet.org/news/companies-announce-formation-of-nuclear-fusion-industrial-association-62024-2-

[88] ITER, Breaking ground at IFMIF-DONES (2023), https://www.iter.org/newsline/-/3938

[89] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, FTF – Testing technology for future fusion power station (2024), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a820d4040f0b62305b9237d/UKAEA_-_Fusion_Technology_Facilities.pdf

[90] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, JET's Decommissioning and Repurposing: A new chapter at UK Atomic Energy Authority (2024), https://ccfe.ukaea.uk/wp-content/uploads/files/JDR_New_Chapter_UKAEA.pdf

[91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Visits Chile to Sign Agreements on Plastic Pollution and Lithium Mining (2024), https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-visits-chile-to-sign-agreements-on-plastic-pollution-and-lithium-mining

[92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Director General Grossi Visits Peru to Sign Agreements on Atoms4Food, Mining and Lithium (2024), https://www.iaea.org/newscenter/news/director-general-grossi-visits-peru-to-sign-agreements-on-atoms4food-mining-and-lithium

[93] US DEPARTMENT OF ENERGY, DOE Announces $46 Million for Commercial Fusion Energy Development (2023), https://www.energy.gov/articles/doe-announces-46-million-commercial-fusion-energy-development

[94] OFFICE OF CONGRESSIONAL AND INTERGOVERNMENTAL AFFAIRS, Before the House Committee on Science, Space, and Technology Subcommittee on Energy (2023), https://www.energy.gov/congressional/articles/house-committee-science-space-and-technology-subcommittee-energy-4

[95] THE WHITE HOUSE, Parallel Processing the Path to Commercialization of Fusion Energy (2022), https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/202203/06//parallel-processing-the-path-to-commercialization-of-fusion-energy/

[73] RECHARGE, 'Fusion in five years' | AI and Facebook billionaire-backed pioneer signs Microsoft up for 'star power' (2023), https://www.rechargenews.com/energy-transition/fusion-in-five-years-ai-and-facebook-billionaire-backed-pioneer-signs-microsoft-up-for-star-power/21450880-1-

[74] WORLD NUCLEAR NEWS, OPG investigates fusion as future option for Ontario (2024), https://world-nuclear-news.org/Articles/OPG-investigates-fusion-as-future-option-for-Ontar

[75] BRUCE POWER, Bruce Power, General Fusion, and Nuclear Innovation Institute sign agreement to advance a net-zero future (2022), https://www.brucepower.com/202202/02//bruce-power-general-fusion-and-nuclear-innovation-institute-sign-agreement-to-advance-a-net-zero-future/

[76] CHINA DAILY, Controlled nuclear fusion emerges as new frontier for China's venture capitalists (2024), https://www.chinadaily.com.cn/a/20240723//WS669f5ca3a31095c51c50f7ad.html

[77] CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, China Sets to Build Fusion Energy Research Facility (2023), https://english.cas.cn/newsroom/mutimedia_news/202309/t20230918_376979.shtml

[78] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Chinese Fusion Energy Programs Are A Growing Competitor in the Global Race to Fusion Power (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/chinese-fusion-energy-programs-are-a-growing-competitor-in-the-global-race-to-fusion-power/

[79] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), https://www.bloomberg.com/news/articles/202402-01-/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company

[80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, World Survey of Fusion Devices 2022, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022)

[81] HONG, S.H., et al., Neutronics analysis for conceptual design of target system based on a deuteron accelerator-driven fusion neutron source, Fusion Eng. Des. 199 (2024) 114103 https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.114103

[82] BUSINESS TIMES, Singapore could star in the race towards nuclear fusion energy (2024), https://www.businesstimes.com.sg/esg/singapore-could-star-race-towards-nuclear-fusion-energy

[83] HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Thailand Tokamak 1 (TT-1) Facility Officially Launched in Thailand (2023), https://english.hf.cas.cn/nr/ps/202307/t20230728_334143.html

[84] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Research in Southeast Asia: IAEA and ITER Support School in Thailand (2020), https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-research-in-

قائمة المختصرات المستعملة في النص الإنكليزي

AI	الذكاء الاصطناعي
CFETR	مفاعل اختبار هندسة الاندماج الصيني
CFS	شركة Commonwealth Fusion Systems
CNL	المختبرات النووية الكندية
DONES	المصدر النيوتروني الإيضاحي
DTT	اختبار جهاز التوكاماك القائم على محرف
EU	الاتحاد الأوروبي
EU-DEMO	محطة قوى الاندماج الإيضاحية الأوروبية
EVEDA	أنشطة التحقق الهندسي والتصميم الهندسي
HTS	التوصيل الفائق عند درجات الحرارة المرتفعة
IFMIF	المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية
JET	الطارة الأوروبية المشتركة
KSTAR	مرفق التوكاماك البحثي المتقدم الفائق التوصيل
NIF	مرفق الإشعال الوطني
PPP	الشراكة بين القطاعين العام والخاص
UKAEA	هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة
W7-X	محطة Wendelstein 7-X

ملاحظة تحريرية

حُرِّر هذا المنشور من جانب موظفي هيئة التحرير في الوكالة بقدر ما اعتُبِر ذلك ضرورياً لمساعدة القارئ.

وهو لا يتناول مسائل تتعلق بالمسؤولية، قانونية كانت أم غير قانونية، عن أفعال أو الامتناع عن أفعال من جانب أي شخص.

وعلى الرغم من توخي قدر كبير من الحرص للحفاظ على دقة المعلومات الواردة في هذا المنشور، لا تتحمل الوكالة ولا دولها الأعضاء أي مسؤولية عن العواقب التي قد تنشأ عن استخدام تلك المعلومات. والتوجيهات المقدمة في هذا المنشور، التي تصف الممارسات الجيدة، تمثل آراء الخبراء ولا تشكل توصيات صادرة على أساس توافق في آراء الدول الأعضاء.

واستخدام تسميات معيَّنة لبلدان أو أقاليم لا يعني ضمنًا إصدار أي حكم من جانب الناشر، أي الوكالة، بشأن الوضع القانوني لهذه البلدان أو الأقاليم أو سلطاتها ومؤسساتها أو تعيين حدودها.

وذكر أسماء شركاتٍ أو منتجاتٍ معيَّنة (سواء مع الإشارة إلى أنها مسجّلة أو دون تلك الإشارة) لا يعني ضمنًا وجود أي نية لانتهاك حقوق الملكية، كما لا ينبغي أن يُفسَّر على أنه تأييد أو توصية من جانب الوكالة.

ولا تتحمَّل الوكالة أي مسؤولية عن استمرارية أو دقّة الوصلات الإلكترونية للمواقع الشبكية الخاصة بطرف خارجي أو طرف ثالث المشار إليها في هذا الكتاب ولا تضمن أن يكون، أو أن يظلَّ، أي محتوى يرد في تلك المواقع الشبكية دقيقًا أو ملائمًا. ■

ملاحظة بشأن حقوق التأليف والنشر

جميع منشورات الوكالة العلمية والتقنية محمية بموجب الاتفاقية العالمية لحقوق التأليف والنشر بصيغتها المعتمدة في عام 1952 (جنيف) والمنقحة في عام 1971 (باريس). ومنذ ذلك الحين، وسعت المنظمة العالمية للملكية الفكرية في جنيف نطاق حقوق التأليف والنشر ليشمل الملكية الفكرية الإلكترونية والافتراضية. قد يكون من اللازم الحصول على إذن لاستخدام كامل النصوص الواردة في منشورات الوكالة أو أجزاء من تلك النصوص في شكل مطبوع أو إلكتروني. لمزيد من التفاصيل، يُرجى الاطلاع على www.iaea.org/publications/rights-and-permissions ويمكن توجيه

https://doi.org/10.61092/iaea.xf4c-d4uy

الدول التالية أعضاء في الوكالة الدولية للطاقة الذرية

أفغانستان
ألبانيا
الجزائر
أنغولا
أنتيغوا وباربودا
الأرجنتين
أرمينيا
أستراليا
النمسا
أذربيجان
جزر البهاما
البحرين
بنغلاديش
بربادوس
بيلاروس
بلجيكا
بليز
بنن
بوليفيا (دولة - المتعددة القوميات)
البوسنة والهرسك
بوتسوانا
البرازيل
بروني دار السلام
بلغاريا
بوركينا فاسو
بوروندي
كابو فيردي
كمبوديا
الكاميرون
كندا
جمهورية أفريقيا الوسطى
تشاد
شيلي
الصين
كولومبيا
جزر القمر
الكونغو
كوستاريكا
كوت ديفوار
كرواتيا
كوبا
قبرص
الجمهورية التشيكية
جمهورية الكونغو الديمقراطية
الدانمرك

جيبوتي
دومينيكا
الجمهورية الدومينيكية
إكوادور
مصر
السلفادور
إريتريا
إستونيا
إسواتيني
إثيوبيا
فيجي
فنلندا
فرنسا
غابون
غامبيا
جورجيا
ألمانيا
غانا
اليونان
غرينادا
غواتيمالا
غينيا
غيانا
هايتي
الكرسي الرسولي
هندوراس
هنغاريا
آيسلندا
الهند
إندونيسيا
إيران (جمهورية - الإسلامية)
العراق
آيرلندا
إسرائيل
إيطاليا
جامايكا
اليابان
الأردن
كازاخستان
كينيا
جمهورية كوريا
الكويت
قيرغيزستان
جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية
لاتفيا

لبنان
ليسوتو
ليبيريا
ليبيا
لختنشتاين
ليتوانيا
لكسمبرغ
مدغشقر
ملاوي
ماليزيا
مالي
مالطة
جزر مارشال
موريتانيا
موريشيوس
المكسيك
موناكو
منغوليا
الجبل الأسود
المغرب
موزامبيق
ميانمار
ناميبيا
نيبال
هولندا، (مملكة -)
نيوزيلندا
نيكاراغوا
النيجر
نيجيريا
مقدونيا الشمالية
النرويج
عُمان
باكستان
بالاو
بنما
بابوا غينيا الجديدة
باراغواي
بيرو
الفلبين
بولندا
البرتغال
قطر
جمهورية مولدوفا
رومانيا
الاتحاد الروسي

رواندا
سانت كيتس ونيفس
سانت لوسيا
سانت فنسنت وجزر غرينادين
ساموا
سان مارينو
المملكة العربية السعودية
السنغال
صربيا
سيشيل
سيراليون
سنغافورة
سلوفاكيا
سلوفينيا
جنوب أفريقيا
إسبانيا
سري لانكا
السودان
السويد
سويسرا
الجمهورية العربية السورية
طاجيكستان
تايلند
توغو
تونغا
ترينيداد وتوباغو
تونس
تركيا
تركمانستان
أوغندا
أوكرانيا
الإمارات العربية المتحدة
المملكة المتحدة لبريطانيا العظمى وآيرلندا الشمالية
جمهورية تنزانيا المتحدة
الولايات المتحدة الأمريكية
أوروغواي
أوزبكستان
فانواتو
جمهورية فنزويلا البوليفارية
فييت نام
اليمن
زامبيا
زمبابوي

وافق المؤتمر المعني بالنظام الأساسي للوكالة الدولية للطاقة الذرية الذي عُقد في المقر الرئيسي للأمم المتحدة في نيويورك، في 23 تشرين الأول/أكتوبر 1956، على النظام الأساسي للوكالة الذي بدأ نفاذه في 29 تموز/يوليه 1957. ويقع المقر الرئيسي للوكالة في فيينا.

”في حين نسعى إلى التغلب على تعقيدات هذه التكنولوجيا الرائدة، يبقى عزمنا على تسخير قوة طاقة الاندماج من أجل عالم قوامه الاستدامة والازدهار والسلام عزماً راسخاً“

المدير العام للوكالة،
السيد رافائيل ماريانو غروسي