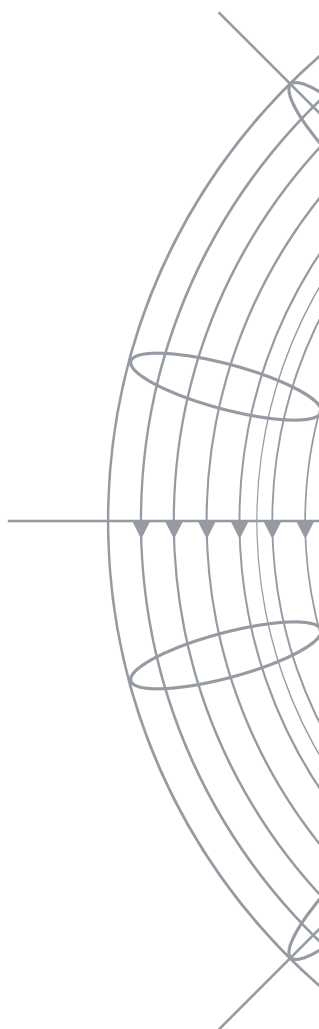




العناصر الأساسية للاندماج

رؤية مشتركة لتطوير طاقة الاندماج



العناصر الأساسية للاندماج

رؤية مشتركة لتطوير طاقة الاندماج

الوكالة الدولية للطاقة الذرية

فيينا، 2024

تصدير

على مدى عدة عقود، ظلت طاقة الاندماج تلوح في الأفق بوصفها حلاً ممكناً، وإنما بعيد المنال، لتوفير الطاقة النظيفة المستدامة على الصعيد العالمي. لكن الوضع قد تغير الآن. فقد شهد قطاع الاندماج في الآونة الأخيرة تطورات تجعل من نشر محطات الاندماج في المستقبل القريب احتمالاً واقعياً بصورة متزايدة.

وفي حين تظل القوة الدافعة الرئيسية للقطاع هي البرامج الوطنية والدولية من قبيل مشروع إيتير، فإنه يمر الآن بمرحلة تحول غير مسبقة، تهيأت لها الظروف بفضل تحقيق فتوحات علمية مهمة اقترنت بزيادة كبيرة في استثمارات القطاع الخاص. وقد لاحظتُ في تفاعلاتي مع العلماء والمهندسين العاملين في القطاع قدراً كبيراً من الحماس والشغف والثقة، في سياق السعي الحثيث لتحقيق العديد من الأفكار المبتكرة لنشر نظم طاقة الاندماج. وفي الوقت الذي يواجه فيه عالمنا تحدياً مزدوجاً بسبب تغير المناخ وأمن الطاقة، سيكون ظهور مصدر جديد للطاقة النظيفة عاملاً بالغ الأهمية في إيجاد حل طويل الأجل.

وبالإضافة إلى ذلك، فقد لاحظتُ حرص الجهات الفاعلة الرئيسية على التعاون وتبادل الخبرات والمعارف والموارد بطريقة هادفة لحل المسائل المتبقية وإرساء قاعدة صناعية لتطوير طاقة الاندماج المستدامة. ولتيسير ذلك، من المهم أن تتقاسم جميع الجهات المعنية بتطوير طاقة الاندماج رؤية مشتركة وفهماً مشتركاً بشأن المسار نحو الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج. ومع وضع هذه الأهداف المنشودة في الاعتبار، تصدر الوكالة هذا المنشور الذي يحدد مجموعة من العناصر الأساسية للاندماج بهدف توفير خريطة طريق شاملة وإرشادات قيمة للعلماء والمهندسين والرقابيين ورواد المشاريع وواضعي السياسات في جميع أنحاء العالم، من أجل مستقبل تؤدي فيه طاقة الاندماج دوراً محورياً في مشهد الطاقة العالمي في الأجلين القصير والمتوسط.



ويتناول المنشور الاعتبارات الجوهرية اللازمة لتحقيق هذه الرؤية، من خلال ستة عناصر محورية ينطوي كل منها على جوانب أساسية من الإطار العام لطاقة الاندماج. وهذه العناصر الستة هي تحديد أولويات ومقاييس البحث والتطوير والإيضاح، والمعامل الرئيسية على طريق الاستغلال التجاري؛ وإدارة الموارد والقوى العاملة والمعارف؛ والأمان والأمن وعدم الانتشار؛ والتعاون الدولي؛ وأدوار الجهات المعنية؛ والتواصل مع الجمهور. وتشكل هذه العناصر مجتمعة العمود الفقري لوضع استراتيجية متماسكة تتيح التغلب على التعقيدات واغتنام الفرص في سياق العمل على تطوير طاقة الاندماج.

وتعرب الوكالة عن امتنانها لجميع من ساهموا في إعداد هذا المنشور، بمن فيهم أعضاء المجلس الدولي لبحوث الاندماج وغيرهم من الخبراء والمستعرضين الدوليين، على مساهماتهم القيمة والتزامهم بإصدار هذا المنشور في غضون فترة زمنية قصيرة. وسيظل موقف الوكالة ثابتاً إزاء دعم تطوير طاقة الاندماج، ومناصرة المبادرات التي تدنينا من تحقيق حلم توفير الطاقة النظيفة بلا حدود. فلنتمسك معاً بالبشرى التي تعدنا بها طاقة الاندماج، لنرسم مساراً نحو مستقبل أكثر إشراقاً واستدامة للجميع.

رافائيل ماريانو غروسي
المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية

المقدمة

تبشّر تكنولوجيا الاندماج بأن تكون مورداً وفيراً ونظيفاً ومستداماً يكفل تلبية احتياجاتنا من الطاقة في المستقبل، ولذلك فإن المساعي الرامية إلى الاستفادة منها على أرض الواقع تكتسب زخماً متزايداً على الصعيد العالمي. وحتى وقت قريب، كانت جهود تطوير طاقة الاندماج تُبذل أساساً في إطار برامج وطنية ودولية، مثل مشروع مفاعل إيتير. بيد أن الحاجة الملحة إلى مصادر الطاقة النظيفة من أجل كافحة تغير المناخ وضمان أمن الطاقة أدت إلى تحول كبير في هذا المجال. وقد شهدت الآونة الأخيرة تحقيق فتوحات مهمة في علوم وتكنولوجيا الاندماج، واقترن ذلك بتدفق استثمارات كبيرة من القطاع الخاص، مما أدى سريعاً إلى إحداث نقلة نوعية في مشهد طاقة الاندماج. وبالإضافة إلى الجهود التي يبذلها القطاع العام من أجل التقدم في تطوير طاقة الاندماج نحو التطبيق العملي، صار هناك قطاع خاص يشهد توسّعاً ملحوظاً، بما يشمل أكثر من 40 شركة نشطة وأكثر من 7 مليارات دولار¹ أمريكي من الاستثمارات، ويعطي الأولوية لجهود الاستغلال التجاري.

ورغم اختلاف النُهُج التكنولوجية المتبعة والترتيبات التمويلية المعمول بها لتطوير طاقة الاندماج، يشترك القطاعان العام والخاص في هدف واحد هو أن يكون الاندماج مصدراً مجدياً ومستداماً للطاقة. ويبرز هذا الهدف المشترك أهمية زيادة التعاون بين الحكومات وكيانات القطاع الخاص، وهو أمر بالغ الأهمية للتعجيل بالانتقال من البحوث إلى الاستغلال التجاري.

¹ وفقاً لحالة القطاع في تموز/يوليه 2024 [المراجع 1].

وفي حين بثّت هذه التطورات روح التفاؤل بشأن إمكانية تحقيق طاقة الاندماج في المستقبل القريب، فلا تزال هناك حاجة لإحراز مزيد من التقدم في العديد من مجالات البحث والتطوير والإيضاح. وبالإضافة إلى ذلك، فاعتماد طاقة الاندماج ونشرها بنجاح يستلزم توسيع القاعدة الصناعية، وإنشاء سلاسل إمداد عالمية، وتكوين قوى عاملة كفؤة، ووضع مبادئ توجيهية قانونية وتنظيمية واضحة، والحصول على دعم الجمهور - وكل هذه العناصر تتطلب التواصل والعمل بالتعاون مع مجموعة متنوعة من الجهات المعنية.

وفي قطاع سريع التطور على هذا النحو، لابد من إرساء فهم مشترك للاعتبارات الرئيسية المحيطة بطاقة الاندماج. ويشمل هذا الفهم كل شيء من البحث والتطوير إلى النشر والاستغلال التجاري، ويشكل الأساس اللازم للتعامل مع التعقيدات القائمة والفرص المتاحة في مشهد طاقة الاندماج. ويقدم هذا المنشور لمحة شاملة عن العناصر الأساسية الستة اللازمة لتكوين رؤية مشتركة بشأن تطوير طاقة الاندماج، ومن ثم تيسير اتباع نهج موحد للنهوض بالاندماج حتى يكون ركيزة أساسية من ركائز حلول الطاقة في المستقبل.

العناصر الأساسية الستة للاندماج

الصفحة 8

1
البحث والتطوير
والإيضاح

الصفحة 14

2
الإنتاج على النطاق الصناعي

الصفحة 22

3
الأمان و الأمن
عدم الانتشار

الصفحة 30

4
التعاون العالمي

الصفحة 38

5
الجهات المعنية

الصفحة 48

6
التواصل مع الجمهور

هدف واحد

أن يكون الاندماج مصدراً
مجدياً ومستداماً للطاقة



1

تحديد أولويات ومقاييس البحث والتطوير والإيضاح، والمعالم الرئيسية على طريق الاستغلال التجاري

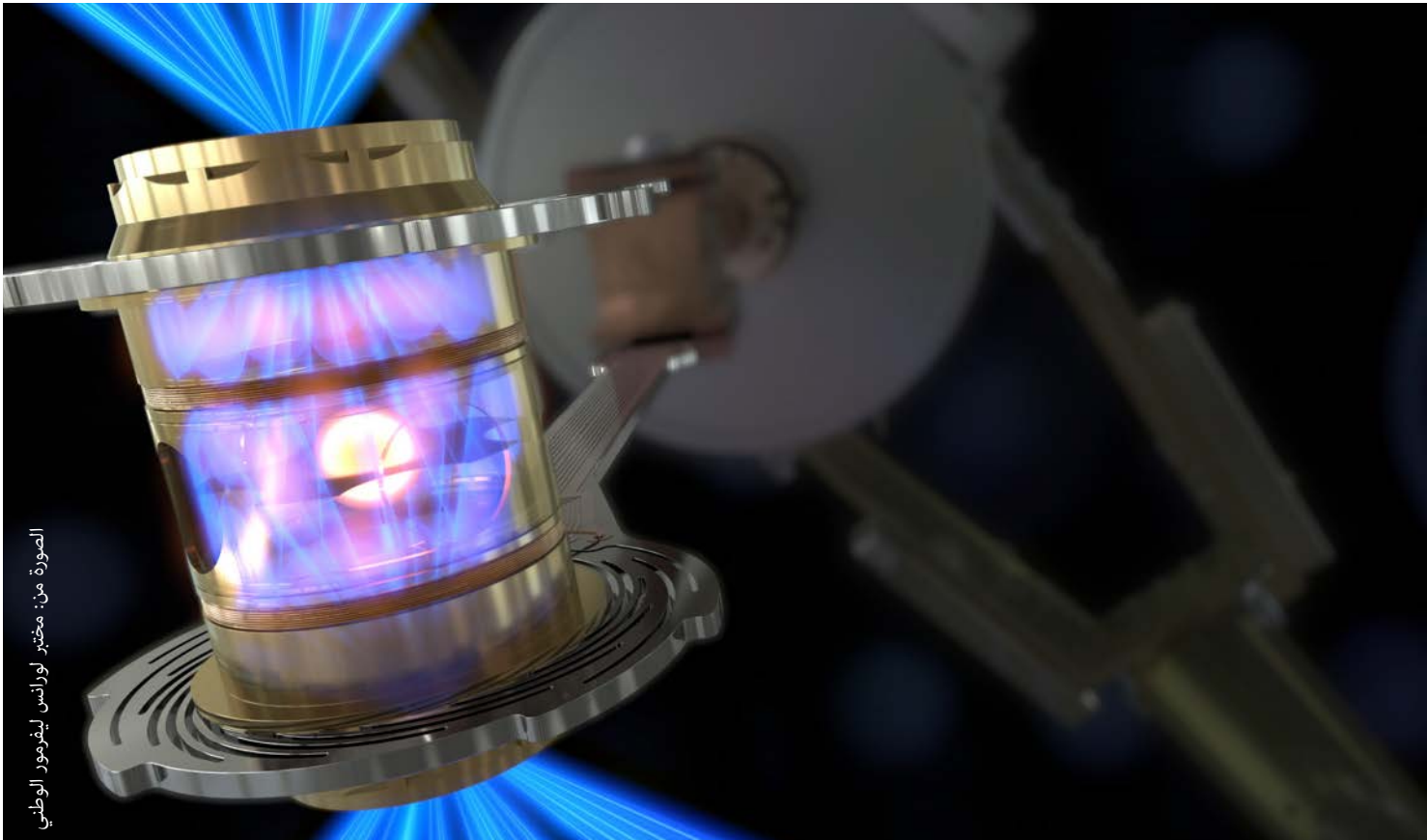
يتطلب الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج إحراز مزيد من التقدم في المجالات العلمية والتكنولوجية المتصلة بالاندماج. ولابد من استمرار دعم أنشطة البحث والتطوير حتى يتسنى التعجيل بإيضاح تشغيل محطات الاندماج وبدء نشرها، وكذلك إنشاء سلاسل الإمداد اللازمة.

تحديد أولويات البحث والتطوير والإيضاح وتوثيق التقدم المحرز

عند تناول المجالات التي تتطلب تحقيق مزيد من التقدم، من المهم التمييز بين مستويات النضج المختلفة التي بلغتها المكونات المتعددة التي تدخل في محطات الاندماج، فضلاً عن إمكانية إدماج هذه المكونات في نظام متماسك قادر على إنتاج الطاقة بطريقة مجدية تجارياً.

ويرد أدناه تحديد لمجالات البحث والتطوير الأساسية اللازمة لإنشاء محطة اندماجية والتي لا يزال مستوى جاهزيتها التكنولوجية منخفضاً². ورغم أن كل مجال من هذه المجالات له أهميته الحاسمة، يُنظر إلى مجالين بعينهما باعتبارهما يتصدران قائمة الاحتياجات الملحة اللازم تليبيتها حتى يمكن إنتاج الطاقة من اندماج الديوتيريوم/التريتيوم، ألا وهما: تطوير مواد قادرة على تحمل الظروف البالغة الشدة اللازمة لعملية الاندماج، ودورة وقود التريتيوم.

² مستوى الجاهزية التكنولوجية هو مقياس يكفل طريقة موحدة وموضوعية لتقييم مدى النضج الذي بلغته التكنولوجيات المختلفة ومكوناتها المختلفة.



المواد القادرة على تحمل الظروف البالغة الشدة

ينتج عن عملية الاندماج تدفقٌ كثيف من النيوترونات والجسيمات العالية الطاقة، مما يؤدي إلى تعريض المواد الهيكلية لظروف بالغة الشدة. ويُعدُّ إيجاد مواد تتميز بقدرة أكبر على تحمل هذه الظروف مع الحفاظ على السلامة الهيكلية وعلى بقاء التنشيط عند مستويات مقبولة عاملاً ذا أولوية قصوى في تحسين الجدوى التجارية للاندماج. ويتعين أيضاً أن تتوافق هذه المواد مع إمكانية المحافظة على نقاء البلازما ومع الظروف الحرارية والإشعاعية والفراغية الصعبة داخل جهاز الاندماج. وتنطوي بعض المفاهيم الابتكارية، مثل استخدام السوائل في البطانة الداخلية لجهاز الاندماج، على إمكانية التخفيف من بعض المتطلبات المتعلقة بالمواد الهيكلية. ومن المهم أيضاً مراعاة الآثار المحتملة لهذه الظروف البالغة الشدة على مجموعة متنوعة من المواد الأخرى، بما في ذلك المواد المستخدمة في مكونات مثل دُثُر التوليد ونظم تشخيص الأعطال ونظم التدفئة ونظم المناولة عن بعد والمحركات، ودراسة مجموعة من خصائص المواد تتجاوز السمات الميكانيكية وحدها.

دورة وقود التريتيوم

التريتيوم نظير مشع للهيدروجين، وهو وقود رئيسي في المحطات القائمة على اندماج الديوتيريوم/التريتيوم. بيد أن العمر النصفى للتريتيوم قصير نسبياً (12 عاماً)، كما أنه ليس موجوداً بوفرة في البيئة الطبيعية. ويُعدُّ تطوير تقنيات كفاءة لتوليد التريتيوم واستخلاصه عاملاً أساسياً للتمكين من بدء إنتاج الطاقة والاستمرار فيه في المحطات القائمة على اندماج الديوتيريوم/التريتيوم.

إدارة تفريغ فائض القوى من البلازما

يتمثل أحد التحديات الرئيسية التي ستواجهها محطات الاندماج في إدارة تفريغ فائض الحرارة والجسيمات من البلازما. وفي سياق نهج الاحتواء المغناطيسي، هناك تحدٍ إضافي يتمثل في التفاعلات بين البلازما والمواد في الحالة المستقرة. وتطرح ظروف كثافة القوى البالغة الشدة في محطات الاندماج تحديات هندسية كبيرة فيما يتعلق بالمواد المواجهة للبلازما وتقنيات التبريد وتصميم المكونات، من بين أمور أخرى. ولا يزال التقدم في البحوث المتعلقة بإيجاد منظومات بلازما ملائمة يشكلُ احتياجاً تجريبياً رئيسياً.

المناولة عن بعد

تعمل محطات الاندماج في بيئات تشغيلية قاسية لا يمكن للمشغلين البشر الوصول إليها. ونتيجة لذلك، يمكن لمهام الصيانة والإصلاح أن تتطلب المناولة عن بعد. ومن الضروري أن تتواصل الجهود الجارية لتطوير نظم المناولة عن بعد، بما في ذلك استخدام النظم الروبوتية المتقدمة، لأغراض التطبيقات التجارية لطاقة الاندماج.

استخلاص الحرارة

يتعين استخلاص الطاقة المتولدة داخل محطة الاندماج بكفاءة، كما يتعين أن تكون المكونات اللازمة لذلك متوفرة بمستوى كافٍ حتى يمكن إنتاج الكهرباء بتكلفة تنافسية. وفي حالة المفاهيم القائمة على الدورات البخارية، فإن كفاءة المحطة من الناحية الديناميكية الحرارية ترتفع كلما أمكن تشغيل الدثار في درجة حرارة أعلى، مما يستلزم استخدام مواد تنشط أقل.

وتنطبق على معظم مفاهيم طاقة الاندماج نفس الاعتبارات فيما يتعلق بالبحث والتطوير والإيضاح، باستثناء بعض المجالات الإضافية التي تتطلب التطوير والتي تختلف باختلاف تكنولوجيا الاحتواء³ وخيار الوقود⁴. وبعد زيادة مستوى الجاهزية التكنولوجية للمجالات التي ناقشناها، فإن نجاح الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج يتطلب تحسين التصميم وصولاً للمستوى الأمثل وتوافر المكونات المتحقق من صلاحيتها (مثل المواد المحتملة للإشعاع، وأجهزة الاستشعار المعززة لمقاومة الإشعاع) في بيئة محطة الاندماج، مع مراعاة القيود المتصلة بالأمان والقيود الاقتصادية منذ المراحل الأولى. ويشمل ذلك وضع حلول متكاملة تجمع بين علوم البلازما المحترقة وتكنولوجيا الاحتواء وإدارة الحرارة والتدريج.

ولابد من بذل جهود متضافرة في جميع مجالات البحث والتطوير والإيضاح المشار إليها أعلاه. ومن خلال الاستفادة من التطورات التكنولوجية مثل الحوسبة العالية الأداء والذكاء الاصطناعي والتصنيع المتقدم، يمكن التعجيل بالتقدم في ميدان طاقة الاندماج، ومن ثم تمهيد الطريق أمام الاستغلال التجاري على نطاق أوسع. وبالإضافة إلى ذلك، فإن إنشاء البنية الأساسية اللازمة (مثل المرافق والنظم والأطر) لدعم دورة الحياة الكاملة لطاقة الاندماج أمر حيوي لنجاح استغلالها تجارياً.

وأخيراً، ومع انتقال طاقة الاندماج من مرحلة التطوير إلى مرحلة الإيضاح والنشر، من المهم أن تعمل الجهات المعنية القائمة والناشئة في قطاع طاقة الاندماج على توثيق النتائج الجديدة وتقاسمها على النحو الواجب. ومن الخطوات الأساسية اتباع الأساليب التقليدية مثل تنفيذ عمليات استعراض النظراء، وضمان الشفافية في الاتصالات بشأن التقدم المحرز، وحماية الملكية الفكرية عند الاقتضاء، والتواصل الفعال مع الحكومات والمستثمرين والجمهور من خلال استراتيجية للاتصالات.

³ على سبيل المثال، في حالة الاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي، تشمل المجالات الرئيسية للبحث والتطوير والإيضاح أيضاً زيادة أحجام التكنولوجيات المستخدمة في المحركات والأهداف بطريقة اقتصادية.

⁴ يتحدد اختيار الوقود حسب نوع عملية الاندماج قيد النظر؛ مثل اندماج الديوتيريوم/الترتييوم، أو الديوتيريوم/الديوتيريوم، أو الديوتيريوم/الهليوم-3، أو البروتون/البروتون-11.

مقاييس البحث والتطوير والإيضاح، والمعالم الرئيسية على طريق الاستغلال التجاري

- ← يمكن استخدام مقاييس التطور التالية لتقييم التقدم المحرز في البحث والتطوير والإيضاح في مجال طاقة الاندماج:
- ← إيضاح إمكانية تحقيق مستوى عالٍ من الأداء مع التشغيل المستمر (أو التشغيل النبضي بمعدل تكرار مرتفع في حالة الاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي والاندماج القائم على الجمع بين الاحتواء المغناطيسي والاحتواء بالقصور الذاتي)، مع تحقيق ظروف عند مواضع التقاء البلازما بالمواد تضمن عمراً مقبولا للمكونات الموجودة داخل الوعاء.
- ← في حالة المفاهيم القائمة على اندماج الديوتيريوم/التريتيوم:
- تحقيق نسبة لتوليد التريتيوم⁵ أكبر من واحد صحيح، وقد ينطوي ذلك على الإثراء بالليثيوم-6؛
- إيضاح استخلاص التريتيوم بكفاءة وإعادة تدويره؛
- إنشاء سلاسل إمداد ملائمة لإنتاج وقود التريتيوم؛
- ← إثبات تحقيق مكسب صافي في الطاقة يمكن استخلاصه من محطة الاندماج.
- ولا بد من بلوغ المعالم الرئيسية التالية حتى يمكن تحقيق الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج:
- ← إيضاح كفاية الوقود⁶ مع تحقيق مكسب صافي في الطاقة في نفس الوقت وفي نفس المحطة الاندماجية؛
- ← تأمين موقع محطة الاندماج والحصول على رخص/تصاريح التشييد والتشغيل والإخراج من الخدمة؛ وضع استراتيجية مناسبة ومسارات رقابية للتصرف في النفايات؛
- ← ربط محطة الاندماج بنظام لاستهلاك الطاقة أو شبكة كهربائية بسعر تنافسي.

⁵ نسبة المعدل الإجمالي لإنتاج التريتيوم إلى المعدل الإجمالي لاستهلاكه في جهاز الاندماج.

⁶ إما عن طريق الاكتفاء الذاتي أو إمدادات الوقود الخارجية.

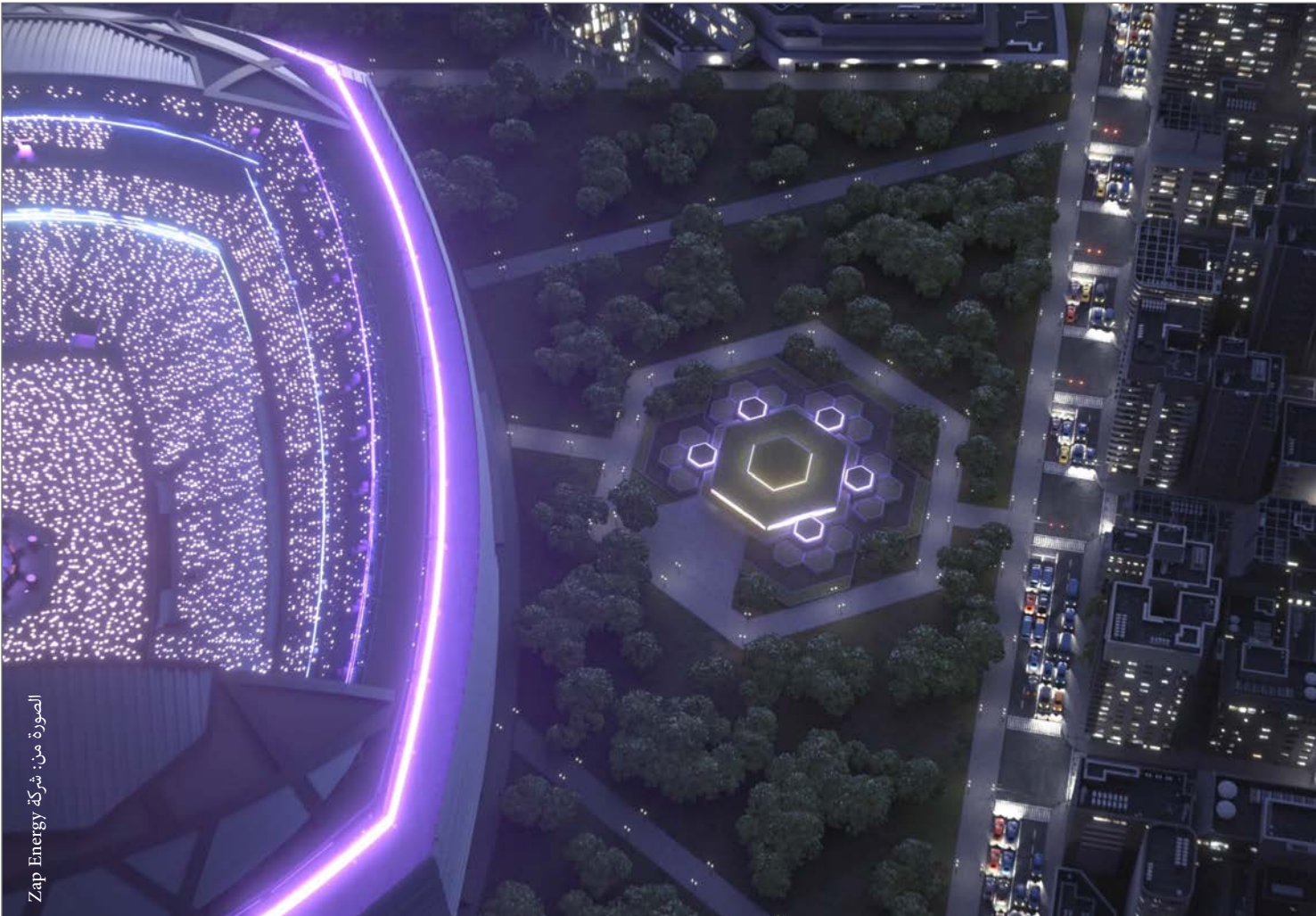
2

إدارة الموارد والقوى العاملة والمعارف لأغراض الإنتاج على النطاق الصناعي

إنَّ إنشاء قطاع صناعي مكتمل الأركان وقادر على إطلاق العنان لإمكانات الاندماج يتطلب توافر الموارد الكافية، وإيجاد تدفقات متزامنة للإيرادات، وتكوين قوى عاملة كفؤة، ووضع استراتيجيات فعالة لإدارة المعارف، وإرساء أطر واضح .

الموارد المالية وآليات التمويل

ينبغي عدم الاستهانة بحجم الاستثمارات المطلوبة، سواء من القطاع العام أو من القطاع الخاص، أو بطول الفترات الزمنية التي سيلزم الحفاظ على تدفق الاستثمارات خلالها. ويرجع ذلك إلى ما ينطوي عليه إتقان الاندماج من تعقيدات تقنية، والشروط الصارمة التي سيتعين على أي محطة لإنتاج الطاقة الالتزام بها، فضلا عن حجم المرافق العلمية والصناعية التي سيلزم توافرها لأغراض البحث والتطوير والاختبار والتصنيع ثم إنتاج الطاقة في نهاية المطاف.





وفي هذا الصدد، تؤدي الموارد العامة والخاصة دورين مختلفين وإنما متكاملين. وستكون للاستثمار من جانب الحكومات أهمية أساسية، كما يلي:

تمويل المشاريع الإيضاحية

تؤدي مشاريع مرافق إيضاح التكنولوجيا و/أو اختبارها دوراً حاسماً في إنشاء قطاع الصناعة وضمان استدامته ولكنها قد تتطلب تمويلاً عاماً إذا كانت لا تشكل أصولاً تجارية. وتتيح هذه المشاريع (مثل مفاعل إيتير) تطوير سلسلة للإمداد، حيث يؤدي التنافس بين الشركات العامة والخاصة على المشاركة إلى تنمية كفاءات هذه الشركات وقاعدتها الصناعية. ويتعين الاستمرار في تمويل هذه المشاريع حتى حين تشهد صعوبات أو حالات تأخير، وينبغي أن تكون على مستوى ملائم من الجدوى التجارية والمدة والعدد بحيث تتيح إنشاء سلسلة إمداد صناعية والمحافظة عليها.

تمويل البحث وأنشطة التطوير المبكر

لا تزال طاقة الاندماج تتطلب جهوداً مهمة على صعيد البحث والتطوير والإيضاح. وتضطلع معاهد البحوث والمؤسسات العامة المماثلة بدور مهم فيما يتعلق بالمجالات ذات المستوى المنخفض من الجاهزية التكنولوجية، وسيطلب إنشاء قطاع صناعي لطاقة الاندماج توفير التمويل المستمر لهذه المؤسسات وبرامجها. ورغم أن المنظمات الخاصة تشارك بقدر أقل في البحوث الأساسية، فهي أيضاً جهات فاعلة مهمة في مراحل التطوير المبكرة وكثيراً ما تتلقى دعماً عاماً من خلال آليات مختلفة مثل المنح والإعفاءات الضريبية والشراكات بين القطاعين العام والخاص. ولا غنى عن توفير الدعم والتمويل من القطاع العام للتعجيل بجهود البحث والتطوير والإيضاح، لا سيما في هذه المرحلة من تطور هذه الصناعة الناشئة. غير أنه ينبغي إيلاء عناية خاصة للاستراتيجية التي ستتبع بالفعل في تقديم هذا الدعم، لأن وضع ترتيبات تنطوي على أعباء مفرطة (مثل تفتت آليات الدعم، وصغر حجم المنح الفردية، والترتيبات المتعلقة بالملكية الفكرية المنشأة، والمعاملة المحاسبية للتكاليف، وأعباء تقديم التقرير) يمكن أن يجعل آليات الدعم غير جذابة للمؤسسات العامة والخاصة على حد سواء.

مفاعل إيتير، أو المفاعل التجريبي الحراري النووي

الدولي، هو أكبر مشروع تجريبي في مجال الاندماج حول العالم، وهو قيد الإنشاء حالياً في فرنسا. وهو ثمرة جهد دولي مشترك بين الاتحاد الأوروبي والاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. والغرض من مفاعل إيتير هو إثبات الجدوى العلمية والتكنولوجية لإنتاج الطاقة عن طريق الاندماج.

ويمكن للتمويل القائم على الاستثمارات الخاصة (بالمشاركة في رأس المال أو الإقراض) أن يشمل الجوانب التالية، على سبيل المثال لا الحصر:

- ← تطوير التكنولوجيا والانتقال بها إلى الإنتاج على النطاق الصناعي من خلال مخططات محددة للاندماج وما يرتبط بتلك المخططات من محطات ومكونات؛
- ← تنمية القدرات الصناعية في شكل كفاءات وعمليات (مثل عمليات التصنيع)، بالإضافة إلى الأدوات اللازمة لتنفيذ هذه المخططات؛
- ← تطوير مرافق الاختبار (مثل دورة الوقود) ومشاريع المحطات (مثل المحطات التجريبية والأولى من نوعها والتالية للأولى من نوعها).

دعم مشاريع المحطات التجريبية و/أو المشاريع الأولى من نوعها

تفترض بعض استراتيجيات الاندماج الوطنية، بناءً على السياسات الوطنية القائمة والممارسات التجارية المتبعة، أن عملية إيضاح تشغيل محطات الاندماج التجارية وبدء نشرها ستقودها كيانات من القطاع الخاص لا مؤسسات عامة. ولتحقيق ذلك، ستحتاج الحكومات إلى تهيئة الظروف للانتقال من القطاع العام إلى القطاع الخاص باستخدام آليات مناسبة لتقاسم المخاطر المرتبطة بالمحطات التجارية المبكرة (المحطات التجريبية و/أو المشاريع الأولى من نوعها)، حيث سيظل التوازن بين المخاطر والمكاسب يتطلب بعض الدعم الحكومي للسماح للقطاع الخاص بحشد رأس المال المطلوب. ويمكن أن يتخذ هذا الدعم أشكالاً متعددة، كما يتضح في قطاعات صناعية أخرى تتسم بقدر مماثل من التعقيد ويقود المشاريع فيها القطاع العام أو القطاع الخاص مدعوماً بآليات لتقاسم المخاطر⁷.

⁷ تشمل آليات تقاسم المخاطر من هذا القبيل، على سبيل المثال لا الحصر، برامج التطوير القائمة على المعالم المرحلية البارزة، أو العقود مقابل الفروقات، أو عقود قاعدة الأصول الخاضعة للتنظيم الرقابي.

القوى العاملة

يحتاج الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج إلى إيجاد منظومة مُحكمة للقوى العاملة، وهو ما يستلزم اتباع نهج شامل يقوم على مبادرات وطنية من كل من القطاعين العام والخاص يمكن أن تدعمها برامج دولية للتعاون وتبادل المعارف.

وبالنظر إلى صغر حجم الأوساط المعنية بالاندماج في الوقت الراهن، فلا بد من بذل جهود متضافرة لاجتذاب العاملين وتعليمهم وتدريبهم لإيجاد قوى عاملة متخصصة ماهرة من العلماء والمهندسين ومديري المشاريع والمشغلين والتقنيين والرقابيين القادرين على مواجهة التحديات المتنوعة التي تنطوي عليها مساعي نشر تكنولوجيا الاندماج بطبيعتها، مع التركيز على إيجاد منظومة أوسع نطاقاً للقوى العاملة تتجاوز التركيز الحالي على تدريب الباحثين للمستقبل.

ولا شك في أن الجهود الرامية إلى إيجاد هذه المنظومة سوف تستفيد كثيراً من أن قطاع صناعة الاندماج بدأ بالفعل يجتذب المواهب والكفاءات والخبرات من قطاعات أخرى. ويمكن التعجيل بذلك من خلال برامج موجهة لتحويل المهارات. ومع ذلك، ينبغي عدم الاستهانة بمستوى المنافسة على أفضل المواهب العلمية والهندسية في مختلف القطاعات الصناعية والمؤسسات البحثية العامة.

وينبغي التركيز على إعداد مهنين متخصصين يتمتعون بعقلية موجهة نحو العمل في قطاع الصناعة وخبرات تقنية واسعة، وبالقدرة على الربط بين التخصصات والخبرات التقنية المتعددة عبر مختلف مراحل دورة حياة المشاريع. والغرض من ذلك هو تلافي تحوُّل التخصصات المختلفة أو مراحل التطوير والتصميم والتنفيذ إلى جزر معزولة، فضلاً عن دعم قطاع الصناعة في تلبية الطلب المتوقع على التوسع والاستغلال التجاري. وبالإضافة إلى ذلك، وبالنظر إلى أن تشغيل محطات الاندماج سيتطلب سلسلة إمداد متينة تجمع بين تكنولوجيات الاندماج العالية التخصص وعناصر يشترك فيها قطاع الاندماج مع قطاعات أخرى، فإن تعزيز هذه القدرة على العمل عبر تخصصات متعددة أمرٌ بالغ الأهمية.

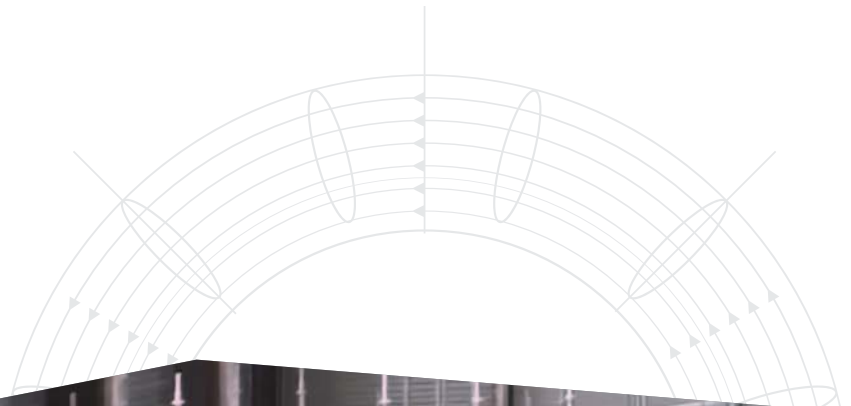


إدارة المعارف

يتطلب إنشاء قطاع صناعة الاندماج والاستغلال التجاري لطاقة الاندماج استحداث معارف علمية وهندسية وتصنيعية وتشغيلية ونشرها على نطاق واسع. واليوم، تشكل المشاريع الممولة من القطاع العام جزءاً هاماً من تطوير هذه المعارف وتقاسمها. ولذلك، فعلى القائمين على تلك المشاريع أن يحرصوا إلى أقصى درجة ممكنة على إنشاء هذه المعارف وتوثيقها ونشرها (بمقتضى بروتوكولات ملائمة). ويمكن تيسير مشاركة القطاعين العام والخاص في إدارة المعارف وتقاسمها من خلال وضع أطر واضحة ومُحكمة للملكية الفكرية. كذلك يمكن للمحافل المعنية بقطاعات الصناعة المختلفة أن تؤدي دوراً هاماً، من خلال تعزيز تقاسم المعلومات الأساسية المتعلقة بجوانب مثل الأمان والأمن والامتياز التشغيلي بما يعود بالنفع على الجميع.

وبما أن قطاع صناعة الاندماج لا يزال قطاعاً ناشئاً، فضلاً عن كونه ينطوي على مجموعة متعددة من النهج التقنية المختلفة، فمن المهم أيضاً تقاسم المعارف مع القطاعات الأقدم ذات المستوى المماثل من التعقيد، وكذلك فيما بين مشاريع الاندماج التي تنظر في نهج احتواء مختلفة. ويمكن للهيئات المهنية والمنظمات التجارية وبرامج التبادل بين الجهات الرقابية أن تؤدي دوراً مهماً في هذا الصدد.

وأخيراً، فإن اكتساب المعارف وتنظيمها من خلال القواعد والمذونات والمعايير الوطنية والدولية، وتقاسم الإرشادات و/أو أفضل الممارسات، يمكن أيضاً أن يدعم بقوة تطوير قطاع الصناعة.



الرحلة نحو الإنتاج على النطاق الصناعي <<<<

رغم أن الاندماج لا يزال مجالا ناشئا، فاستناداً إلى مسار تطور قطاع الطاقة القائم، من المرجح أن تنشأ شركات كبرى تندمج فيها منشآت أصغر، وشركات من طبقة ثانية تتخصص في النظم أو النظم الفرعية المستخدمة في محطات الاندماج، ثم عدد ضخم للغاية من الشركات الصغيرة والمتوسطة الحجم الحائزة للملكية الفكرية لمكونات أو أجزاء محددة. ويتطلب إنشاء قطاع حيوي تدخلات تمكّن هذه الشركات بجميع أنواعها من تنمية كفاءاتها وخبراتها في مجال الاندماج.

وسيكون انتقال تكنولوجيات الاندماج بنجاح من حيز البحث والتطوير المبكر إلى نطاق التطبيقات التجارية عاملاً حاسماً للأهمية في إقامة قطاع صناعي مزدهر في مجال الاندماج. وقد جرت العادة على أن المشاريع الوطنية والدولية الكبيرة الحجم تؤدي دور أوتاد التثبيت⁸ في الواقع العملي، بسبب إسهامها الكبير في الحفاظ على سلسلة الإمداد والموارد البشرية في قطاع الاندماج. ولمواصلة تطوير قطاع صناعة الاندماج، من الضروري أن يواصل القطاع العام القيام بدور نشط في الحفاظ على سلسلة الإمداد من خلال البرامج العامة، بما في ذلك إنشاء مرافق بحثية جديدة، لضمان سلاسة نقل المعارف والخبرات المتراكمة في البرامج العامة إلى قطاع الصناعة في إطار ترتيبات مناسبة. وبذلك ستؤدي هذه البرامج العامة دوراً مكملًا لاستثمارات القطاع الخاص، بما يشمل الأنشطة المبيّنة في الصفحة 17. وبالإضافة إلى ذلك، فهناك عدد من العوامل التمكينية الرئيسية التي ستظل لازمة، بما في ذلك ما يلي:

⁸ المقصود بوتر التثبيت هو التزام طويل الأجل من الحكومة بتوفير قاعدة مستقرة من الإيرادات وتقليل المخاطر المالية للشركات الخاصة، على غرار الدور الذي تقوم به المتاجر الرئيسية في المجمعات التجارية.

وضع إطار قانوني وتنظيمي واضح ومستقر

أحد العناصر المهمة في جذب التمويل من القطاع الخاص ووضع خطط تطوير ذات مصداقية هو الوضوح فيما يتعلق بالإطار القانوني والرقابي، بما في ذلك إنشاء العمليات التي يجري بموجبها الحصول على التصاريح اللازمة لتحديد المواقع والتشييد والتشغيل.

إرساء إطار مُحكم للملكية الفكرية

يُعدُّ إرساء إطار مُحكم للملكية الفكرية أمراً ضرورياً لتيسير التعاون بين الأطراف أثناء الانتقال من مرحلة البحث إلى الاستغلال التجاري للتكنولوجيا.

التعامل مع التكنولوجيات ذات الأهمية المشتركة بين سوق طاقة الاندماج وأسواق أخرى

أحد التحديات الرئيسية التي تواجه إنشاء قطاع صناعي خاص في مجال الاندماج هو أن طول الفترات الزمنية اللازمة للتطوير في هذا المجال يقتضي احتياج المستثمرين لتوافر تدفقات للإيرادات في الأجل القصير والمتوسط. وقد تتأق هذه التدفقات من استغلال التكنولوجيات المطورة للاندماج للتطبيق في أسواق أخرى (مثل المواد الابتكارية والروبوتيات والتطبيقات الطبية). ويمكن تصميم برامج التطوير لتيسير ذلك، سواء في القطاع العام أو في القطاع الخاص.

تهيئة منظومة أوسع لجهود التعاون

من خلال إنشاء مراكز للقدرات في مجال الاندماج (غالباً على المستوى الإقليمي مع دعوة حكومات الدول والحكومات المحلية ومجتمعاتها للمشاركة)، يمكن في كثير من الأحيان تسريع وتيرة إيجاد المعارف وتقاسمها، وكذلك التعجيل بتطوير التكنولوجيات، من خلال تهيئة بيئة ديناميكية تتيح لمجموعة من المنظمات المتعددة أن تتعاون وتتقاسم تكاليف التطوير وتستفيد من جميع الخبرات والكفاءات.

3

الأمان والأمن وعدم الانتشار

ينبغي أن يكون التنظيم الرقابي للأمان والأمن في محطات الاندماج متناسباً مع مخاطرها، مع مراعاة سماتها الفريدة، مثل عدم حدوث تفاعل متسلسل وقابليتها للإغلاق الفوري. وعلى نفس القدر من الأهمية، ينبغي ضمان انخفاض مخاطر الانتشار، سواءً بمراعاة ذلك في التصميم أو من خلال الإشراف الرقابي مع تطور طاقة الاندماج.

أساسيات الأمان الإشعاعي

يُعدُّ ضمان الأمان والأمن في تصاميم طاقة الاندماج عنصراً أساسياً في نشر طاقة الاندماج بنجاح. يتعين أن يكون نهج الأمان الخاص بمحطات الاندماج متسقاً مع ما جاء في العدد SF-1 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، المعنون "مبادئ الأمان الأساسية" [المراجع 2]، والذي ينطبق على جميع الظروف المنطوية على إمكانية التسبب في مخاطر إشعاعية، بما في ذلك الاستخدامات في المجال الطبي وفي توليد الكهرباء وفي التطبيقات الصناعية. والهدف الأساسي في هذا الإطار هو حماية الناس والبيئة من الآثار الضارة للإشعاعات المؤينة.

وتنطبق مبادئ الأمان الأساسية الواردة في العدد SF-1 [المراجع 2] على جميع المرافق والأنشطة المستخدمة للأغراض السلمية، طوال دورة حياتها، وعلى الإجراءات الوقائية للحد من مخاطر الإشعاع القائمة. وتشمل هذه المرافق والأنشطة أي مكان يجري فيه إنتاج المواد المشعة أو معالجتها أو استخدامها أو تناولها أو تخزينها أو التخلص منها على نطاق يتطلب النظر في الوقاية والأمان [المراجع 2]. ولذلك، يمكن أن تنطبق هذه المبادئ على محطات الاندماج، بالنظر إلى أن عملها ينطوي على استخدام المواد المشعة وإنتاجها على نطاق يستدعي النظر في الأمان.

وتتناول الأجزاء من 1 إلى 7 [المراجع من 3 إلى 9] من متطلبات الأمان العامة الصادرة عن الوكالة مواضيع مثل تقييم الأمان والأطر الرقابية. وتنطبق متطلبات الأمان العامة على جميع استخدامات الإشعاع، بما في ذلك أجهزة الاندماج.

ويتعين على المنظمات المسؤولة عن تقييم ومراقبة المخاطر الإشعاعية أن تقيّم وتراقب المخاطر الإشعاعية التي يتعرض لها الناس والبيئة نتيجة عمليات التشغيل العادي والحوادث/الحوادث. وينطبق هذا طوال دورة حياة المرفق، بما يشمل التصميم، والتشغيل، والتصرف في الوقود والنفايات، والتفكيك/الإخراج من الخدمة. وستكون هناك حاجة إلى استخدام أدوات النمذجة والتشخيص لدعم بيان حالة الأمان. ولا بد من النظر في تدابير الأمان منذ بداية عمليات تصميم جميع النظم المعنية. ونظراً لحدثة محطات الاندماج، فإن أوجه عدم التيقن في أداء النظم المختلفة تتطلب معالجة متأنية في تحليل الأمان. وتبعاً للتكنولوجيا المستخدمة، يُتوقع حدوث تفاعلات مختلفة بين المواد (مثل الليثيوم أو الماء) والنظائر المشعة وطاقات الجسيمات، مما يؤدي إلى مجموعة متنوعة من الأخطار التي يلزم النظر فيها. ويتعين على مصممي محطات الاندماج مراعاة هذه المبادئ للحد من الأخطار وتقليل كميات النفايات المشعة، متى أمكن ذلك.

نُهُج التنظيم الرقابي لطاقة الاندماج

هناك تجارب اندماج تم ترخيصها ويجري تشغيلها بالفعل لأغراض البحث والتطوير في بعض الدول الأعضاء في الوكالة. في السنوات القادمة، من المتوقع أن يبدأ المصممون في إنتاج المشاريع التجريبية والإيضاحية الأولى. وإذا نجحت هذه المشاريع، يمكن أن يتبعها توسع كبير في اعتماد محطات الاندماج على النطاق التجاري.

وفي حالة التصاميم التي يجري التفكير في اعتمادها تجارياً على نطاق واسع، تعمل الدول الأعضاء حالياً على تقييم نهج للتنظيم الرقابي لمحطات الاندماج بما يتناسب مع مخاطرها. وتأخذ هذه التقييمات في الحسبان السمات المتأصلة في الاندماج (مثل عدم حدوث تفاعل متسلسل، وإمكانية الإغلاق الفوري عند انقطاع إمدادات الكهرباء)، وخصائص المواد المشعة المعنية، والتصرف في المواد المشعة داخل المواقع. ويقوم هذا النهج على نهج الوكالة المتدرج في التنظيم الرقابي [المراجع 10].

وهناك متطلبات وإرشادات قائمة بالفعل أو يجري العمل على وضعها في الدول الأعضاء فيما يتعلق بمحطات الاندماج والتصرف المأمون في النفايات المشعة، بما يتسق مع الأطر الوطنية ومع الأخطار المرتبطة بتلك المحطات. وتتناول هذه المتطلبات والإرشادات كلاً من الأمان والأمن. ويمكن للوكالة أن تدعم الهيئات الرقابية في وضع متطلبات الأمان وإرشادات الأمن لطاقة الاندماج بما يلائم التكنولوجيا المعنية والأخطار المرتبطة بها، وفي مراعاة الدروس المستفادة مع بلوغ التصاميم مرحلة النضج، مثلما جرى في النظم الرقابية الأخرى.



وللتعاون بين الهيئات الرقابية فائدة كبيرة. حيث إن العمل على اتباع نُهج مشتركة واتخاذ قرارات متسقة من جانب مختلف الدول الأعضاء، متى أمكن ذلك، سيؤدي إلى تبسيط عملية التقدم للحصول على التصاريح، بفعل التقليل من حاجة المصممين إلى تنقيح ما لديهم من تطبيقات وحلول ومبررات تقنية في الولايات القضائية المختلفة.

والالتزام بشروط مشتركة ومواقف مشتركة بشأن المسائل التقنية يمكن أن يساعد جميع الهيئات الرقابية، ولو طبقت نُهجاً رقابية مختلفة. كذلك فالتعاون الرقابي المستمر بشأن التحديات التقنية الناشئة، فضلاً عن المواضيع الأمنية مثل الأمن السيبراني، يمكن أن يساعد على تقاسم المعارف والخبرات بحيث تُعالج هذه المجالات على نحو مناسب في اللوائح المنظمة لعمل محطات الاندماج.

ويمكن للمنظمات الدولية مثل الوكالة أن تيسر إجراء المناقشات الثنائية والمتعددة الأطراف بين الدول الأعضاء التي تعمل على وضع أطر رقابية متقاربة. ومن شأن التنسيق داخل الوكالة من أجل تحقيق اتساق الجهود ومماسكها أن يدعم جميع الدول الأعضاء في النهوض بهياكلها الرقابية المتعلقة بالاندماج. ولا داعي لأن تتخذ الوكالة قراراً بشأن مدى الحاجة إلى وضع معايير أمان خاصة بالاندماج إلى حين بلوغ محطات الاندماج مرحلة النضج.

ويمكن أن يكون للمنظمات المعنية بالمعايير الصناعية دور في وضع نُهج مشتركة للتصميم للمساعدة على تبسيط الاستعراضات الرقابية.



الانتقال إلى الاستغلال التجاري الواسع النطاق لمحطات الاندماج

في الوقت الراهن، لا تزال الخبرات المكتسبة في مجال طاقة الاندماج قاصرة على مشاريع البحث والتطوير. ومن المتوقع أن يُتاح في المستقبل إنتاج طاقة الاندماج واستغلالها تجارياً. وسينطوي ذلك على تشييد محطات اندماجية (محطات نموذجية و/أو إيضاحية و/أو تجارية).

ومع استمرار تطور تكنولوجيا الاندماج، يمكن للهيئات الرقابية أن تنفذ عمليات ملائمة لمستوى التطور الذي بلغته التكنولوجيا. فعلى سبيل المثال، يمكن اتباع نهج متدرج في تحديد متطلبات الترخيص المختلفة ومستوى الإشراف الرقابي في كل مرحلة. وتشمل الاختلافات التي تستدعي اتخاذ قرارات متعلقة بالأمان زيادة أرصدة المواد المشعة؛ ونقل الوقود وتخزينه ومعالجته؛ وفئات النفايات من حيث طبيعة التخلص منها وأحجامها؛ والحاجة إلى التبريد الإيجابي لبعض المكونات. ومن المرجح أن تقف الهيئات الرقابية على زيادة في كفاءة استعراضاتها وعملياتها في المحطات التالية للأولى من نوعها. وعلى وجه التحديد، فقد تكون هناك حاجة إلى وضع نماذج ترخيص جديدة للتصنيع والنشر على نطاق واسع في إطار زمني قصير.



الاعتبارات المتعلقة بمخاطر أخرى

تركز الوكالة والعديد من الهيئات الرقابية المعنية بتنسيق مشاريع طاقة الاندماج في الدول الأعضاء على الأمان والأمن الإشعاعيين. بيد أن محطات الاندماج تنطوي على أخطار محتملة إضافية ذات طابع صناعي ومهني، نظرا لاحتواء النظام على مستوى مرتفع من الطاقة ولوجود مواد يمكن أن تكون سامة. وتتجاوز مناقشة هذه الأخطار بالتفصيل نطاق هذا المنشور. بيد أنه يمكن للأوساط المعنية بطاقة الاندماج أن تناقش، في سياق التواصل مع الجمهور، كيفية تحديد هذه الأخطار والتخفيف من حدتها لحماية العاملين والجمهور.



اعتبارات عدم الانتشار

من المهم أن يضع المصممون في اعتبارهم النظم السائدة لمراقبة تصدير المواد النووية عند النظر في المواد المرتبطة بطاقة الاندماج، مثل التريتيوم والليثيوم-6، وبعض التكنولوجيات، مثل شفرات التحليل.

وفيما يتعلق بتصاميم الاندماج التي لا تنطوي على معالجة المواد النووية أو استخدامها أو إنتاجها، فلا تطبق الوكالة حالياً أي تدابير ضمانات فيما عدا التدابير اللازمة لتسوية المسائل المتعلقة بدقة واكتمال المعلومات المقدمة من الدول، عند الاقتضاء. وتنطبق اتفاقات الضمانات الدولية القائمة على معالجة المواد النووية أو استخدامها أو إنتاجها. ومع توافر المزيد من المعلومات عن تصاميم محطات الاندماج، يلزم إجراء مزيد من الدراسة للتأكد مما إذا كان نطاق ضمانات الوكالة سينطبق على محطات الاندماج بصفة أعم.

⁹ تنطبق ضمانات الوكالة على المواد المصدرية والمواد الانشطارية الخاصة، وفقاً لتعريفها الوارد في المادة العشرين من النظام الأساسي للوكالة.



4

التعاون العالمي

تشهد منظومة طاقة الاندماج تطوراً سريعاً، بفعل جهود التعاون الدولي وزيادة مشاركة القطاع الخاص. والتعاون العالمي ضرورة أساسية لمعالجة المجالات التي تتطلب إحراز مزيد من التقدم وإنشاء سلاسل الإمداد الدولية وتكوين القوى العاملة الماهرة على النحو اللازم للاستغلال التجاري لطاقة الاندماج.

الآفاق المتطورة لمنظومة طاقة الاندماج

لا شك في أن المساعي الرامية إلى تحقيق طاقة الاندماج هي جهود دولية بطبيعتها، وأنها تتطلب تعاوناً عالمياً لمعالجة مجالات البحث والتطوير المتبقية، وإنشاء سلاسل الإمداد الدولية، وتكوين القوى العاملة الماهرة. ويكتسي هذا التفاعل العالمي أهمية حيوية لتحقيق الاستغلال التجاري لطاقة الاندماج بحيث تؤدي دوراً في التحولات المستدامة في مجال الطاقة.

وعلى مدى السنوات الستين الماضية، تقدم العمل على تطوير طاقة الاندماج من خلال جهود تعاونية مكثفة في علوم وتكنولوجيا الاندماج شاركت فيها بلدان مختلفة. ويعد مشروع مفاعل إيتير أبرز مثال على هذه الروح التعاونية. والخطوة المحورية التالية هي ربط هذه الجهود التعاونية التأسيسية بقطاع الصناعة حتى يمكن دمج القطاع الخاص الناشئ في المنظومة القائمة المعنية بتطوير طاقة الاندماج.





ونجد في المبادرات الوطنية، مثل برنامج الاندماج 2040 في ألمانيا، و استراتيجية الابتكار في مجال طاقة الاندماج في اليابان، والاستراتيجية المعنونة نحو طاقة الاندماج في المملكة المتحدة، و استراتيجية طاقة الاندماج لعام 2024 في الولايات المتحدة، أمثلة على السياسات التي تستخدم البنى الأساسية القائمة، وتعزز التعاون فيما بين البلدان والمؤسسات العامة والكيانات الخاصة، وتوفر استراتيجيات ناجحة للجمع بين مشاركين من قطاعات صناعية متعددة ومطوري الاندماج. وقد شهدت الآونة الأخيرة إقامة تحالفات رائدة لاستكشاف إمكانات هذه الجهود التعاونية بين القطاعين العام والخاص، مثل الاتحاد الصيني لطاقة الاندماج في الصين، واتحاد DTT في إيطاليا، وشركة UK Industrial Fusion Solutions Ltd في المملكة المتحدة.

استراتيجية طاقة الاندماج لعام 2024 هي استراتيجية الاندماج الخاصة بالولايات المتحدة الأمريكية والتي تهدف إلى التعجيل بالوصول بطاقة الاندماج إلى مستوى الجدوى التجارية بالشراكة مع القطاع الخاص. وتتضمن الاستراتيجية إطاراً مقترحاً لإنشاء اتحاد معني بطاقة الاندماج بالشراكة بين القطاعين العام والخاص.

الاتحاد الصيني لطاقة الاندماج هو تحالف صناعي أنشأته حكومة الصين لتطوير وتحسين تكنولوجيا الاندماج.

اتحاد DTT هو تحالف بين القطاعين العام والخاص لتشديد وتشغيل مرفق تجريبي للاندماج يحمل اسم DTT اختصاراً لعبارة تجربة جهاز التوكاماك القائم على محرّف.

شركة UK Industrial Fusion Solutions Ltd هي تحالف بين القطاعين العام والخاص لتنفيذ مرفق STEP، وهو نموذج أولي لمحطة قوى اندماجية.

برنامج **الاندماج 2040** هو برنامج تمويل أطلقته حكومة ألمانيا لوضع تصميم لمحطة قوى اندماجية.

استراتيجية الابتكار في مجال طاقة الاندماج هي أول استراتيجية وطنية تضعها اليابان بشأن طاقة الاندماج، وهي تشمل إنشاء مجموعة صناعية (المجلس الياباني لطاقة الاندماج) للتعجيل بتطوير طاقة الاندماج.

الاستراتيجية المعنونة **نحو طاقة الاندماج** هي الاستراتيجية التي وضعتها المملكة المتحدة لتحقيق طاقة الاندماج. وتشمل الاستراتيجية برنامج تصميم وتطوير وتشديد مرفق STEP (مرفق التوكاماك الكروي لإنتاج الطاقة)، وهو محطة قوى اندماجية تجريبية، وبرنامجاً بعنوان Fusion Futures (آفاق الاندماج في المستقبل)، وهو برنامج البحث والتطوير الجديد لحكومة المملكة المتحدة.



وبالإضافة إلى ذلك، فإن نماذج الشراكة بين القطاعين العام والخاص، مثل برنامج تطوير الاندماج القائم على المعالم المرحلية البارزة في الولايات المتحدة ومبادرة INFUSE، توفر أمثلة على وضع آليات فعالة لتيسير حصول قطاع صناعة الاندماج على الموارد التقنية والمالية، وتزيد من تحفيز الاستثمارات الخاصة في مجال الاندماج، وتسريع وتيرة الانتقال من مرحلة البحوث الأساسية إلى الجدوى التجارية. وتشدد هذه البرامج على أهمية التعاون في تحمل المخاطر وبلوغ المعالم المرحلية البارزة وتوفير الدعم الحكومي لرعاية منظومة ديناميكية وشاملة للجميع في مجال الطاقة الاندماجية من أجل نقل التكنولوجيا من مرحلة التطوير المبكر إلى النشر التجاري، مع التركيز على حماية الملكية الفكرية وتنويع النُهُج التكنولوجية.

وبرنامج تطوير الاندماج القائم على المعالم المرحلية البارزة هو برنامج مدته خمس سنوات وضعته وزارة الطاقة في الولايات المتحدة لمساعدة القطاع الخاص على إحراز تقدم في تصاميم محطات الاندماج التجريبية وفي جهود البحث والتطوير المرتبطة بها.

شبكة INFUSE (شبكة الابتكار من أجل طاقة الاندماج) هي مبادرة أطلقتها وزارة الطاقة في الولايات المتحدة لتمكين قطاع صناعة الاندماج من الحصول على الدعم التقني والمالي بمساعدة المؤسسات المعنية بالاندماج الممولة منها.

الاستفادة من التعاون الدولي والشراكات بين القطاعين العام والخاص

تعاون عالمي في بيئة تنافسية صحية

التعاون الدولي جزء لا يتجزأ من تبادل المعارف في مجال علوم وتكنولوجيا الاندماج، وإحراز تقدم في مسارات التطوير الممكنة، والتعجيل بالاستغلال التجاري لطاقة الاندماج. ويكفل التعاون العالمي تجميع الخبرات وتقاسم تكاليف مشاريع البحث والتطوير والإيضاح، والتعجيل بالتقدم المتبادل من خلال تقاسم المعلومات والمعارف، ومساعدة البلدان على إرساء البنية الأساسية اللازمة لتكنولوجيات الاندماج. وقد ازداد الطلب على الوقت والموارد بالتناسب مع التعقيدات التكنولوجية التي تنطوي عليها معالجة المجالات التي تمثل فجوات في البحث والتطوير والإيضاح، مما يؤكد ضرورة التعاون الدولي للإسراع بتحقيق الهدف المتمثل في نشر الاندماج واستغلاله تجارياً من خلال تقاسم المخاطر والاستثمارات. ومن الأمثلة على ذلك جهود التصميم والبحث والتطوير والتشييد في مشروع مفاعل إيتير. ومن خلال تهيئة منظومة تشجع المنافسة الصحية بين مختلف نُهج تطوير طاقة الاندماج، يمكن للاستراتيجيات الوطنية واستراتيجيات القطاع الخاص أن تمضي قدماً جنباً إلى جنب في سياق التعاون العالمي.

الفعالية في استخدام المرافق الكثيفة رأس المال

أنشأت دول عديدة بنية أساسية للبحث والتطوير في مجال طاقة الاندماج من خلال برامج وطنية. ويشمل ذلك إنشاء المرافق التجريبية، ونظم استعادة الوقود، ونظم التخزين، ومرافق حلقات الفلزات السائلة، ومرافق تشعيع المواد، ومرافق الاختبار والتصنيع. ونظراً لكون مرافق الاختبار كثيفة رأس المال بطبيعتها، فإن إنشاءها يمثل عبئاً باهظ التكلفة على كاهل البلدان التي تستهل برامج في مجال طاقة الاندماج. ومن خلال تقاسم استخدام البنى الأساسية على الصعيد الدولي، ومع كيانات القطاع الخاص المشاركة في صناعة الاندماج بصفة أعم، يمكن التعجيل بنشر محطات الاندماج وتجنب ازدواجية الجهود. وبذلك تتوزع التكلفة على بلدين أو أكثر، وتنتفي الحاجة إلى تعدد البنى الأساسية بلا مبرر، وتستفيد كل الأطراف المشاركة، بما في ذلك قطاع صناعة الاندماج على الصعيد الدولي. ويمكن استخدام اتفاقات التعاون المتبادل لوضع هذه الترتيبات موضع التنفيذ.



تقاسم قواعد البيانات وإدارتها

من المهم أن تدرك الأوساط المعنية بالاندماج الأهمية الحيوية لتيسير تحسين فرص الباحثين وواضعي السياسات والجمهور في الحصول على البيانات العلمية، ومن ثم تعزيز الشفافية والقابلية للتكرار وتحفيز تبادل المعارف على الصعيد الدولي. ومن الأمور الأساسية إنشاء منصة مركزية لقواعد البيانات لفائدة أفرقة البحث والتطوير العاملة في مجال علوم وتكنولوجيا الاندماج. وستتيح هذه المنصة أيضا لجميع الجهات المعنية الحصول على البيانات بمختلف الصيغ والتطبيقات المستعملة في سياق طاقة الاندماج.

تبادل العاملين وتنمية القوى العاملة

يتيح التعاون الدولي فرصة الاستفادة من تقاسم الموارد والتنوع الفكري في الأوساط المعنية بالاندماج. ويمكن للدول تسريع تقدمها التكنولوجي من خلال الشراكة مع الدول الأخرى التي لديها برامج وخبرات أكثر تقدما في مجال الاندماج، ومن ثم تحسين برامجها المحلية. كما أن زيادة المشاركة الدولية تزيد من التنوع ومن روافد المواهب التي يخرج منها قادة العلوم في المستقبل. ومن خلال توفير الحوافز الكافية وضمان الإدارة الفعالة لحقوق الملكية الفكرية، تتيح برامج تبادل العاملين بين الأطراف المتعاونة الاطلاع على المرافق المتاحة لدى الأطراف الأخرى في مجالات محددة متصلة بتكنولوجيا الاندماج. وعلى سبيل المثال، يمكن أن تتيح هذه البرامج تدريب العاملين على تشغيل المرافق، مما يحقق فوائد متبادلة.

التحقق من صحة شفرات التصميم

قد يعتمد التصميم وتحليل الأمان اعتماداً كبيراً على الشفرات والأساليب التحليلية. ويمكن لخبراء التصميم في الأوساط المعنية بالاندماج تحديد النهج الذي يتعين على المصممين اتباعه للامتثال للمتطلبات الرقابية. ويمكن تبادل قواعد البيانات والشفرات من أجل التحقق من صحتها وسلامتها من خلال أطر دولية للتعاون.

التعاون الرقابي

سيؤدي نجاح تكنولوجيات طاقة الاندماج إلى تجاوزها الحدود الوطنية ودخولها حيز التكامل العالمي. ومن العوامل التي يمكن أن تسهم في اعتماد طاقة الاندماج وقبولها على نطاق واسع أن يكون التنظيم الرقابي مناسباً ومنسقاً على الصعيد الدولي ومصمماً خصيصاً لمواجهة المخاطر المرتبطة بمحطات الاندماج. ويمكن تحسين الضوابط الرقابية والممارسات الرقابية من خلال التعاون العالمي.

إنشاء سلاسل إمداد متينة وتوافر المواد الرئيسية

من المتوقع أن الحاجة إلى الموارد الرئيسية المستخدمة في تطبيقات الطاقة المستدامة في جميع أنحاء العالم (مثل الديوتيريوم والتريتيوم والهليوم والمواد الهيكلية والليثيوم والبريليوم والتنجستن والنحاس ومركبات كربيد السيليكون) سوف تشهد زيادة هائلة مع التحول العالمي نحو تكنولوجيات الطاقة النظيفة. وستكون هناك منافسة ضارية على الصعيد العالمي للحصول على الموارد الضرورية لتشديد محطات الاندماج وتشغيلها. وفي هذا الصدد، ينبغي التوقف عند سؤالين اثنين: (أ) كيف يمكن زيادة الإنتاج من هذه المواد لتلبية الطلب المتزايد؟ (ب) وما هي المصادر المحتملة للإمداد بالمواد الرئيسية؟ وعن طريق أطر التعاون بين الأوساط المعنية بالاندماج، يمكن للجهات المعنية أن تعمل بطريقة جماعية على تشكيل أولويات البحث والتطوير على طول سلسلة الإمداد. ولا تقتصر مزايا هذا النهج الاستباقي على تعزيز الابتكار فحسب، بل تشمل أيضاً التخفيف من تأثير توافر المواد على تحقيق أهداف الأوساط المعنية بالاندماج، مما يضمن مساراً أكثر كفاءة واستدامة نحو تسخير طاقة الاندماج. والتعاون الوثيق بين الأوساط المعنية بالاندماج أمر أساسي لتحقيق نتائج مفيدة لجميع الأطراف وضمان عدم انقطاع سلسلة الإمداد بالمواد الأساسية، ومن ثم الحفاظ على أمان نظم الطاقة وقدرتها على الصمود.

5

أدوار الجهات المعنية

يتعين على الحكومات الوطنية والهيئات الرقابية والمؤسسات البحثية والأوساط الأكاديمية والشركات الخاصة والمنظمات الدولية والكيانات غير الهادفة للربح أن تعمل في تناغم للتعجيل باعتماد طاقة الاندماج ونشرها.



الحكومات الوطنية

بالنظر إلى ضخامة الموارد اللازمة للتعجيل بإيضاح محطات الاندماج ونشرها، والدور المحوري الذي يمكن أن تؤديه طاقة الاندماج في إيجاد نظام طاقة خالٍ من الكربون، فسوف تكون الحكومات الوطنية بالضرورة من الجهات الفاعلة والجهات المعنية الرئيسية. وفي هذا الصدد، من المرجح أن ينطوي دورها على القيام بما يلي:

إصدار سياسة وطنية وخريطة طريق لدعم إنشاء قطاع صناعة الاندماج

ينبغي أن تستوفي الإجراءات التي تتخذها الحكومة الوطنية عدة شروط، منها أن تكون مفهومة جيداً من جانب جميع الجهات المعنية، وأن يكون تنفيذها متسقاً ومستمرّاً من جانب مختلف الجهات التابعة، والأهم هو أن تكون موجهة لتحقيق هدف عام محدد ورؤية واضحة. وتضع البلدان سياسات وخرائط طريق وطنية تبين أهدافها فيما يتعلق بطاقة الاندماج، مع تحديد الغايات المستهدفة والجدول الزمني والأساليب المتبعة. ومن المهم للغاية أن تُقرّ هذه السياسات بالمساهمة الكبيرة التي يمكن أن تقدمها طاقة الاندماج في التصدي لتغير المناخ وتعزيز أمن الطاقة، وأن تعالج الجوانب الجوهرية لعوامل التمكين وعلاقات الترابط وأشكال التبعية، مثل التمويل والإعانات، لدعم دخول طاقة الاندماج إلى الأسواق وقدرتها التنافسية. ويمكن أن يتجاوز نطاق هذه الاستراتيجيات مرحلة النشر الأولي، ليشمل تفصيل الخطوات نحو التنفيذ الواسع النطاق ضمن إطار زمني مناسب.

تعريف دور الحكومة وتوقعاتها من الجهات المعنية الأخرى

سوف تتخذ الحكومات الوطنية قرارات حاسمة فيما يتعلق بالأنشطة التي ستمولها أو ستديرها من خلال كيانات مملوكة ملكية عامة، والأنشطة التي ستؤدي فيها في المقام الأول وظيفة التمكين أو التيسير، مع توقع أن يتولى القطاع الخاص وظيفة الاستثمار والتنفيذ. وسيلزم تعريف هذه الأدوار والأنشطة المحددة التي تشملها والتوقعات والقواعد المتعلقة بمشاركة القطاع الخاص بطريقة واضحة وشفافة. وستشكل هذه العناصر جزءاً لا يتجزأ من السياسات الوطنية.

وضع الأطر القانونية والرقابية

تتمثل إحدى الوظائف الرئيسية للحكومات الوطنية في وضع الأطر القانونية والرقابية المناسبة على وجه السرعة. ولا يقل أهمية عن ذلك دورها في وضع معايير اختيار المواقع وضمان قبول الجهات المعنية. وللأطر القانونية والرقابية أهمية حيوية في توجيه تطوير التكنولوجيا مع وضع الأولويات الصحيحة في الاعتبار، مثل الأمان والأمن وعدم الانتشار. كما أنها تمكن المطورين من تحقيق نتائج موثوقة من حيث التصاميم المبكرة وتقديرات التكلفة، مع طمأننة المستثمرين على أن المخاطر القانونية والرقابية محددة جيداً ومستقرة ويمكن إدارتها.

إجراء مناقشة وطنية ومحلية صحية وقائمة على الحقائق

للقبول المجتمعي أهمية كبيرة في تطوير التقنيات الجديدة ونشرها. لذلك، يمكن للحكومات الوطنية أن تؤدي دوراً في التواصل مع الجمهور وإذكاء وعيه، وتعزيز إقامة حوار متبادل ومنفتح ومستند إلى المعلومات وقائم على العلم بشأن طاقة الاندماج، ودورها في نظام الطاقة الوطني وفي الاقتصاد الوطني، وحجم الاستثمار المطلوب ونطاقه الزمني، والفوائد التي يمكن أن تجلبها هذه التكنولوجيا.

الهيئات الرقابية

الهيئات الرقابية هي جهات فاعلة رئيسية في إنشاء قطاع صناعة الاندماج، وهي كذلك من الجهات الرئيسية المعنية بذلك القطاع. وسيتعين على الهيئات الرقابية أن تعمل على بناء المهارات والكفاءات الخاصة بها مع تطور التكنولوجيا، بما في ذلك من خلال التعاون مع قطاع الصناعة ومعاهد البحوث.

والتعاون فيما بين الهيئات الرقابية الوطنية مهم أيضا لضمان تقاسم الدروس المستفادة في مختلف الولايات القضائية، ودعم إنشاء الهيئات الرقابية الجديدة، والتعجيل بالتنسيق بين النهج الرقابية. ولهذه العناصر جميعاً أهمية أساسية في إنشاء سوق دولية كبيرة الحجم.



معاهد البحوث والأوساط الأكاديمية

لا شك في أن الغرض الأساسي من وجود النشاط البحثي المعني بالاندماج في القطاع الأكاديمي هو دعم الاكتشافات العلمية. وتضطلع معاهد البحوث والهيئات الأكاديمية (بما في ذلك الجامعات ومؤسسات التعليم التقني العالي)، سواء العامة أو الخاصة، بدور رئيسي من خلال تنفيذ البرامج البحثية اللازمة لزيادة الجاهزية التكنولوجية وإمكانية الاستغلال التجاري للتكنولوجيات التمكينية الرئيسية وصولاً إلى النقطة التي يمكن عندها أن يتولى القطاع الخاص مواصلة تطويرها. وهناك حاجة إلى تشجيع هذه الأنشطة، وتشجيع التعاون مع القطاع الخاص بصفة أعم (مثل إتاحة الوصول إلى مرافق البحوث)، مع التركيز على تطوير تكنولوجيات مهيأة للاستغلال التجاري في نهاية المطاف. ويتعين دعم التعاون بين كيانات القطاعين الخاص والعام بإطار سليم لتبادل المعارف وإنشاء الملكية الفكرية وحمايتها، وتوجيه التركيز إلى برامج البحوث المتعددة التخصصات.

وتؤدي معاهد البحوث والأوساط الأكاديمية أيضاً دوراً رئيسياً في توفير التدريب وتطوير الكفاءات، إما معزلة عن برامج تنمية الشراكات أو من خلالها. وسيتيح ذلك الاحتفاظ بالقوى العاملة في المستقبل وتجديدها، وإرساء الفهم الفيزيائي اللازم لإنشاء محطة اندماج على أرض الواقع. ويمكن لمعاهد البحوث والأوساط الأكاديمية أيضاً أن تقيم شراكات من خلال برامج مشتركة مع قطاع الصناعة والهيئات الرقابية، مما يساعد على تنمية القوى العاملة. ويمكنها أيضاً أن تقدم الدعم التقني مباشرة إلى الهيئات الرقابية من خلال توفير أحدث الكفاءات والمرافق والخبرات.

وأخيراً، يمكن لمعاهد البحوث والأوساط الأكاديمية أيضاً أن تساهم في تنمية قطاع الصناعة وتعزيز قبوله في المجتمع من خلال مجال العلوم الاجتماعية.



بائعو تكنولوجيا الاندماج

يمثل بائعو تكنولوجيا الاندماج جزءاً مهماً من تطوير قطاع صناعة الاندماج. وتعتمد هذه المؤسسات على أعمال البحث والتطوير المبكر لإيجاد منتجات صناعية يمكن بيعها وتشبيدها وإدخالها في الخدمة وتشغيلها. ومع تطور قطاع الصناعة، ستظهر مجموعة متنوعة من الكيانات التي ستضطلع بأدوار مختلفة في تصميم مرافق إنتاج الطاقة وتشبيدها وإدخالها في الخدمة وتشغيلها. وفي هذه المرحلة المبكرة، يصعب تحديد المسؤوليات المحددة التي يتولاها بائعو التكنولوجيا والكيانات الأخرى.

وينطوي ظهور بائعي تكنولوجيا الاندماج من القطاع الخاص والاستثمار فيهم على مصالح سوقية محتملة لها أهمية حيوية في دعم وتبرير الاهتمام الدولي المتزايد بتطوير الاندماج وإيضاحه ونشره في الوقت المناسب. وحتى الآن، هناك أكثر من 40 شركة خاصة تعمل في مجال الاندماج على مستوى العالم، وتدعمها استثمارات تزيد قيمتها على 7 مليارات دولار. وتعمل هذه الشركات على طائفة واسعة من تكنولوجيات طاقة الاندماج القائمة على الاحتواء المغناطيسي¹⁰، والاحتواء بالقصور الذاتي¹¹، والاحتواء المزدوج بالمجال المغناطيسي وبالقصور الذاتي¹². وينطوي عمل هذه الشركات أيضاً على النظر في طائفة واسعة من خيارات وقود الاندماج، بما في ذلك الديوتيريوم/التريتيوم، أو الديوتيريوم/الديوتيريوم، أو الديوتيريوم/الهليوم-3، أو البروتون/البورون-11. ورغم أن لكل نهج محدد من نهوج تكنولوجيا الاندماج احتياجات مختلفة من حيث البحث والتطوير، فإن هناك بعض مجالات البحث والتطوير المفيدة عموماً والتي يمكن أن تستفيد منها معظم الشركات الخاصة العاملة في مجال تكنولوجيا الاندماج، مثل استحداث مواد أكثر مقاومة للإشعاعات لاستخدامها في البطانة الداخلية وتطوير تكنولوجيا الدُّثر.



¹⁰ تشمل تقنيات الاحتواء المغناطيسي النظم القائمة على أجهزة التوكاماك، وأجهزة التوكاماك الكروية، وأجهزة الستلاريترور والهليوترور، ونسق المجال المعكوس، والمرآة المغناطيسية، والمجال المغناطيسي المحلّق ذي القطبين، والحافة المغناطيسية، والنظم الإلكترونية المختلطة.

¹¹ تشمل تكنولوجيات الاحتواء بالقصور الذاتي النظم الليزرية والنظم القائمة على الضغط الناشئ عن مقذوف.

¹² تشمل تكنولوجيات الاحتواء المزدوج بالمجال المغناطيسي وبالقصور الذاتي، على سبيل المثال لا الحصر، النظم القائمة على ضغط السوائل، ونسق المجال المعكوس، وجهاز احتواء زيتا، ونفاث البلازما، ونظم الاندماج بالقصور الذاتي والبطانة الممغنطة.

سلاسل الإمداد

بالإضافة إلى بائعي تكنولوجيا الاندماج، سيتطلب التخطيط لمحطات الاندماج وتصميمها وتشبيدها وإدخالها في الخدمة وتشغيلها وجود سلسلة إمداد متينة تشمل مجالات عديدة. وفي حين أن بعض هذه المجالات يختص به قطاع الاندماج وحده إلى حد بعيد، فإن العديد منها يتداخل مع قطاعات أخرى، مثل الطاقة النووية، والنفط والغاز، والفضاء الجوي، وتكنولوجيا الفضاء. ويؤدي هذا التداخل إلى إدخال عنصر متعلق بالتنافس على القوى العاملة الماهرة والموارد، لأن هذه الصناعات تحتاج أيضاً إلى خبرات وقدرات تكنولوجية مماثلة. وتشمل الجهات الفاعلة المحتملة في سلسلة إمداد الاندماج موردي المواد الرئيسية، ومصنعي المكونات، وشركات هندسة المحطات، وشركات الإنشاءات العامة، وموردي المعدات، ومقدمي الخدمات المتخصصة وغير المتخصصة على حد سواء. ونظراً لما تتسم به سلسلة إمداد الاندماج من اتساع نطاقها وتنوع عناصرها، فمن المرجح أن تكون دولية في امتدادها الجغرافي.

ويعود التنافس على القوى العاملة عاملاً حاسماً يمكن أن يؤثر على تطور صناعة الاندماج. ومع زيادة التقاطع بين تكنولوجيا الاندماج وقطاعات أخرى عليها طلب مرتفع، فسيكون استقدام القوى العاملة الماهرة والاحتفاظ بها أمراً بالغ الأهمية. وبغية التصدي لهذا التحدي، لابد من التخطيط الاستراتيجي للقوى العاملة والتعاون فيما بين قطاعات الصناعة المختلفة لضمان ألا تعاني جهود تطوير طاقة الاندماج من نقص في المهارات والخبرات الأساسية.



المنظمات الدولية

تلعب المنظمات الدولية دوراً محورياً في تطوير طاقة الاندماج. ويشمل ذلك الدور المجالات الرئيسية التالية:

- ← يمكن للمنظمات أن تدعم تطوير البنية الأساسية اللازمة للبحث والتطوير في مجال طاقة الاندماج، بما في ذلك مرافق البحوث، فضلاً عن البنية الأساسية اللازمة لمحطات الاندماج التجارية في المستقبل. وكثيراً ما تساعد هذه المنظمات على توفير التمويل والموارد الضرورية لمشاريع البحث والتطوير والإيضاح في مجال طاقة الاندماج. ونظراً لارتفاع التكاليف وطول الجداول الزمنية المرتبطة بتطوير الاندماج، يمكن للتعاون الدولي أن يدعم تجميع الموارد من بلدان متعددة، ومن ثم التمكين من تنفيذ المشاريع الطموحة.
- ← تيسر المنظمات الدولية التعاون بين البلدان والعلماء والباحثين، مما يتيح تقاسم المعارف والخبرات ونتائج البحوث. ويمكن لهذه الجهود التعاونية أن تساعد على سد الفجوات المعرفية، وتسريع التقدم التكنولوجي، والتغلب على التحديات التقنية بمزيد من الكفاءة. وبالإضافة إلى ذلك، فمن شأن تعزيز مشاركة المنظمات الدولية في جهود التوعية العامة والتثقيف أن يؤدي إلى إذكاء الوعي وتحسين فهم طاقة الاندماج. ويمكن أن يساعد ذلك في الحصول على دعم الجمهور لمشاريع طاقة الاندماج.
- ← يمكن للمنظمات الدولية أن تساهم في التوصية بالسياسات التي تدعم تطوير طاقة الاندماج ونشرها واعتمادها. ويمكن أن يشمل ذلك السياسات المتعلقة بالتعاون الدولي وآليات التمويل وتوفير الحوافز لجهود البحث والتطوير والإيضاح.

المنظمات غير الهادفة للربح

يمكن للمنظمات غير الهادفة للربح أن تؤدي أدواراً متعددة في رصد الاهتمام العام وتيسير الحوار العام في سياق تطوير تكنولوجيا الاندماج ونشرها. وبالإضافة إلى مناصرة طاقة الاندماج بوجه عام، يمكن للمنظمات غير الهادفة للربح أن تقدم إسهاماً رئيسياً في المناقشات الدولية والوطنية والمحلية حول قضايا مثل تغير المناخ وعدالة الطاقة والآثار البيئية، وإسماع صوت الفئات المختلفة والمجتمعات المحلية.

وتؤدي المنظمات التجارية دوراً مهماً في تنظيم العمل الجماعي من خلال تمكين شركات القطاع الخاص من تبادل المعارف بهدف وضع معايير مشتركة للأداء، وكذلك، عند الاقتضاء، التحدث بلسان جماعي مع الحكومات والهيئات الرقابية بشأن المسائل الرئيسية. ويمكن لمساهمة المنظمات التجارية أن تشمل أيضاً توفير معلومات واقعية وقائمة على أساس علمي ومحدثة للجهات المعنية الرئيسية، مثل الحكومات والهيئات الرقابية والجمهور.



6

التواصل مع الجمهور والتوعية والاتصالات

تنطوي طاقة الاندماج على إمكانية توفير حل طويل الأجل لتغير المناخ وأمن الطاقة، وإيصال هذه الرسالة بطريقة فعالة عاملٌ حاسم الأهمية لضمان دعم الجمهور للجهود الرامية لتحويل هذه الإمكانية إلى واقع.



التواصل الفعال عن طريق الحوار المتبادل

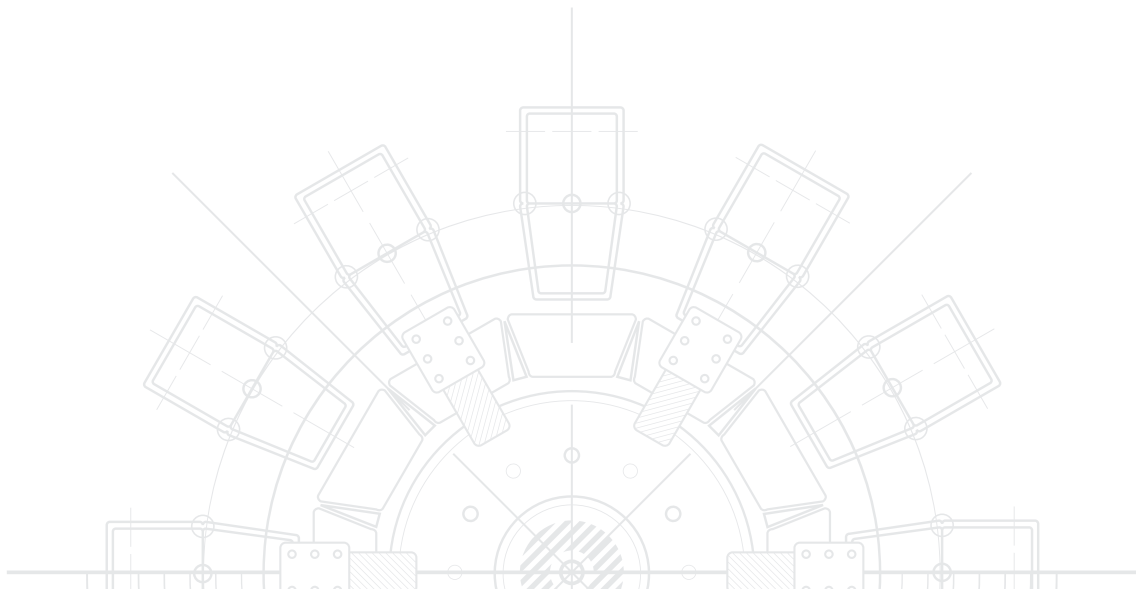
لا شك في أن الحوار المتبادل هو السبيل الأنجع لتعزيز قبول الجمهور لطاقة الاندماج. ويمكن هذا النهج المصممين والحكومات وسائر الجهات المعنية من فهم ومراعاة الاحتياجات والاهتمامات والجداول الزمنية المحلية، بما في ذلك الآراء المتعلقة بمواضيع مثل عدالة الطاقة والعدالة البيئية والآثار البيئية. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الحوار المتبادل يتيح للجمهور أن يفهم المخاطر الإشعاعية والتكنولوجيات المستخدمة والجداول الزمنية الواقعية لعمليات النشر. ويجب أن تُدار عمليات الحوار وفقاً لاحتياجات الجمهور واهتماماته، ويجب أن تكون المشاركة فيها قائمة على اهتمام صادق ومن جانب خبراء موثوقين، بما في ذلك ممثلين للحكومة وقطاع الصناعة والهيئات الرقابية. ومن خلال المحاورات المتكررة والقائمة على تبادل الآراء في الاتجاهين، يمكن إجراء تعديلات مبكرة تعالج مخاوف الجمهور وتيسر القبول الاجتماعي. أما عمليات الاتصال التي تبدأ في مراحل متأخرة أو التي يبدو أن الهدف منها يقتصر على الإعلام أو الشرح، فمن الممكن أن تُعتبر غير آمنة ما لم تتوفر أي فرصة لأخذ رد فعل الجمهور في الحسبان.

وقد شهدت السنوات الأخيرة الاضطلاع بعمل كثير من أجل تطوير مفهوم بناء القبول، بل والحماس، في صفوف الجمهور من خلال عمليات التواصل المتبادل من هذا القبيل [المراجع من 11 إلى 13]. وانطلاقاً من هذه الجهود، يمكن للأوساط المعنية بالاندماج أن تتعلم من النُهج الناجحة المتبعة في صناعات أخرى وتطبقها، بما في ذلك نهج "الترخيص الاجتماعي" [المراجع 14]، المعمول به في سياق المناجم أو التكنولوجيات البيوطبية؛ ونهج "استعراض الأخلاقيات البيولوجية" [المراجع من 15 إلى 17]، المعمول به في سياق التكنولوجيات البيوطبية المتبكرة؛ ونهج "البحث والابتكار المسؤول" [المراجع من 18 إلى 20]، الذي يستعين بآراء الجمهور في مراحل التصميم المبكرة؛ وأساليب "التصميم المشترك" [المراجع 21]، التي تجمع بين الجمهور والخبراء التقنيين للعمل على تصميم التكنولوجيا بطريقة جماعية.



وفي جميع هذه النُهُج، يجب أن تكون المناقشات بشأن طاقة الاندماج شفافة وموضوعية فيما يتعلق بالتقدم المحرز والجدول الزمني للاعتماد التجاري على نطاق واسع، والفوائد والتحديات المحتملة، والموارد اللازمة لتطوير طاقة الاندماج ونشرها. وتشمل الفوائد التي تهتم الجمهور دعم الانتقال إلى الطاقة النظيفة، والتنمية الاقتصادية والمجتمعات المحلية التي تعاني من نقص الخدمات، وتلبية الطلب المتزايد على الطاقة، والنهوض بمجالات أخرى من خلال التكنولوجيات المستحدثة في إطار البحث والتطوير في مجال الاندماج (مثل مجالات المواد والمغناطيسات وتكنولوجيات البلازما).

وتشمل التحديات التي تهتم الجمهور التصرف في النفائات مقارنة بقطاعات الصناعة الأخرى واحتمال وقوع أخطار أو انبعاثات خارج الموقع. ومن المهم التواصل بوضوح بشأن المخاطر المحتملة، سواء في سياق العمليات التشغيلية العادية أو في حالة الحوادث والحوادث المحتملة، وكيفية التخفيف من هذه المخاطر للحد من العواقب خارج الموقع أو منعها تماماً. ومن خلال الالتزام بالشفافية وإدراج التخطيط لمواجهة الطوارئ، حسب الاقتضاء، في تدابير الوقاية، يمكن طمأنة الجمهور وبناء الثقة العامة والقبول العام. وفي الوقت نفسه، ينبغي توخي الحذر عند التمييز بين الاندماج والتكنولوجيات الأخرى، وكذلك عند التمييز بين مختلف تكنولوجيات الاندماج. ومن المهم أن يتجنب القائمون على الاتصالات الانتقاص عن غير قصد من قدر أي تكنولوجيا وأن يأخذوا في الاعتبار مواقف جمهورهم ونُهجهم المفضلة. وعن طريق اختيار الصياغة الأنسب للسياق، قد يمكن تجنب العواقب غير المقصودة والتعبير بدقة عن المرحلة التي بلغها المشروع في تطوره (مثل المحطات التجريبية أو الإيضاحية أو النموذجية أو التجارية).





المراجع

- [1] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Global Fusion Industry in 2024, FIA, Washington, DC (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/annual-global-fusion-industry-report.pdf>
- [2] الجماعة الأوروبية للطاقة الذرية، ومنظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، والوكالة الدولية للطاقة الذرية، ومنظمة العمل الدولية، والمنظمة البحرية الدولية، ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، ومنظمة الصحة للبلدان الأمريكية، وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة، ومنظمة الصحة العالمية، مبادئ الأمان الأساسية، العدد SF-1 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (2007)، <https://doi.org/10.61092/iaea.hmxn-vw0a>
- [3] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، الإطار الحكومي والقانوني والرقابي، العدد GSR Part 1 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة (الصيغة المنقّحة 1 Rev.)، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (2016).
- [4] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، القيادة والإدارة فيما يتعلق بالأمان، العدد GSR Part 2 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (2016)، <https://doi.org/10.61092/iaea.cq1k-j5z3>
- [5] EUROPEAN COMMISSION, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014), <https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>
- [6] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، تقييم أمان المرافق والأنشطة، العدد GSR Part 4 (الصيغة المنقّحة Rev.1) من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (2016).
- [7] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، التصرف في النفايات المشعة تمهيداً للتخلص منها، العدد GSR Part 5 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (2009).
- [8] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، إخراج المرافق من الخدمة، العدد GSR Part 6 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (2016).
- [9] منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، والوكالة الدولية للطاقة الذرية، ومنظمة الطيران المدني الدولي، ومنظمة العمل الدولية، والمنظمة البحرية الدولية، والمنظمة الدولية للشرطة الجنائية - إنتربول، ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، ومنظمة الصحة للبلدان الأمريكية، واللجنة التحضيرية لمنظمة معاهدة الحظر الشامل للتجارب النووية، وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة، ومكتب الأمم المتحدة لتنسيق الشؤون الإنسانية، ومنظمة الصحة العالمية، والمنظمة العالمية للأرصاد الجوية، التأهب للطوارئ النووية أو الإشعاعية والتصدي لها، العدد GSR Part 7 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية، الوكالة، فيينا (2016)، <https://doi.org/10.61092/iaea.3dbe-055p>
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of a Graded Approach in Regulating the Safety of Radiation Sources, IAEA-TECDOC-1974, IAEA, Vienna (2021).

- [11] HOEDL, S.A., Achieving a social license for fusion energy, *Phys. Plasmas* **29**(9) (2022) 092506,
<https://doi.org/10.1063/5.0091054>
- [12] HOEDL, S. Social acceptance is as important as low costs and net energy production for climate and energy poverty impact, *J. Fusion Energ.* **42** (2023) 22,
<https://doi.org/10.1007/s10894-023-00355-x>
- [13] GUPTA, K., et al. Americans' views of fusion energy: Implications for sustainable public support, *Fusion Sci. and Technol.* **2024** (2024) 1–17,
<https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2328457>
- [14] GUNNINGHAM, N., KAGAN, R.A., THORNTON, D., Social license and environmental protection: Why businesses go beyond compliance, *Law & Social Inquiry*, **29**(2) (2004), 307–341,
<https://doi.org/10.1111/j.17474469.2004.tb00338.x>
- [15] UNESCO, National Bioethics Committees in Action, UNESCO, Paris (2010),
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189548?posInSet=1&queryId=a17553d74-2780-e51-b9d3-a495cecdab90>
- [16] NUFFIELD COUNCIL ON BIOETHICS, Novel Techniques for the Prevention of Mitochondrial DNA Disorders: An Ethical Review, Nuffield Council on Bioethics, London (2012).
- [17] WARNOCK M., et al., Report of the Committee of Inquiry into Human Fertilisation and Embryology, U.K. Department of Health & Social Security, London (1984),
<https://www.hfea.gov.uk/media/2608/warnock-report-of-the-committee-of-inquiry-into-human-fertilisation-and-embryology-1984.pdf>
- [18] STILGOE, J., OWEN, R., MACNAGHTEN, P., Developing a framework for responsible innovation, *Res. Policy* **42**(9) (2013) 1568–1580,
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>
- [19] OWEN, R., MACNAGHTEN, P., STILGOE, J., Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. *Sci. Publ. Policy* **39**(6) (2012) 751–760,
<https://doi.org/10.1093/scipol/scs093>
- [20] BRAND, T., BLOK, V., Responsible innovation in business: a critical reflection on deliberative engagement as a central governance mechanism, *J. Responsible Innov.* **6**(1) (2019) 4–24,
<https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1575681>
- [21] SMITH J.M., *Extracting Accountability: Engineers and Corporate Social Responsibility*, MIT Press, Cambridge, MA (2021).

المساهمون في الصياغة والاستعراض

الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Abdullah, M.S.
وزارة الطاقة في الولايات المتحدة، الولايات المتحدة الأمريكية	Allain, J.P.
روزاتوم، الاتحاد الروسي	Anikeev, A.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Artisiuk, V.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Asic, M.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Ashraf, S.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Barbarino, M.
المنظمة المعنية بمفاعل إيتير	Becoulet, A.
المركز القومي للبحوث معهد كورشاتوف، الاتحاد الروسي	Budaev, V.
هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة، المملكة المتحدة	Chapman, I.
الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة، الولايات المتحدة الأمريكية	Clark, T.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	De Caires Watson, D.
شركة Helion Energy، الولايات المتحدة الأمريكية	Desai, S.
شركة Commonwealth Fusion Systems، الولايات المتحدة الأمريكية	Ellis, T.
اتحاد مختبرات الاندماج الأوروبية EUROfusion، ألمانيا	Federici, G.
مؤسسة Post Road، الولايات المتحدة الأمريكية	Hoedl, S.
الجامعة الوطنية الأسترالية، أستراليا	Hole, M.
وزارة الطاقة في الولايات المتحدة، الولايات المتحدة الأمريكية	Hsu, S.
معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما، ألمانيا	Jenko, F.
شركة First Light Fusion، المملكة المتحدة	Junillon, C.
المصدر النيوتروني الإيضاحي التابع للمرفق الدولي لتشجيع المواد الاندماجية (IFMIF-DONES)، إسبانيا	Ibarra, A.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Kaneko, T.
معهد بحوث البلازما، الهند	Kumar Ellapan, R.
المعهد الجنوبي الغربي للفيزياء، الصين	Li, P.
المعاهد الوطنية لعلوم وتكنولوجيا الكم والإشعاع، اليابان	Matsumoto, T.
هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة، المملكة المتحدة	Milnes, J.
المعهد الكوري لطاقة الاندماج، جمهورية كوريا	Oh, Y.
المعهد الوطني لعلوم الاندماج، اليابان	Osakabe, M.
معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما، ألمانيا	Poli, E.
مفوضية الطاقة الذرية والطاقات البديلة، فرنسا	Pussieux, T.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Rance, P.J.
اتحاد تجربة اختبار التوكاماك القائم على محرّف (DTT Consortium)، إيطاليا	Romanelli, F.
هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة، المملكة المتحدة	Shannon, M.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Tadger, D.
شركة Kyoto Fusioneering، اليابان	Takeda, S.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Wagner, R.
المعهد الوطني لعلوم الاندماج، اليابان	Yokoyama, M.

اجتماعات الاستشاريين

فيينا، النمسا: 25-29 كانون الثاني/يناير 2024، و27-29 شباط/فبراير 2024، و16-18 نيسان/أبريل 2024

الدول الأعضاء في الوكالة الدولية للطاقة الذرية

الاتحاد الروسي	البوسنة والهرسك	سلوفاكيا	لاتفيا
إثيوبيا	بولندا	سلوفينيا	لبنان
أذربيجان	بوليفيا، (دولة -	سنغافورة	لختنشتاين
الأرجنتين	المتعددة القوميات)	السنغال	لكسمبورغ
الأردن	بيرو	السودان	ليبيا
أرمينيا	بيلاروس	السويد	ليبيريا
إريتريا	تايلند	سويسرا	ليتوانيا
إسبانيا	تركمانيستان	سيراليون	ليسوتو
أستراليا	تركيا	سيشيل	مالطة
إستونيا	ترينيداد وتوباغو	شيلي	مالي
إسرائيل	تشاد	صربيا	ماليزيا
إسواتيني	توغو	الصين	مدغشقر
أفغانستان	تونس	طاجيكستان	مصر
إكوادور	تونغا	العراق	المغرب
ألبانيا	جامايكا	عُمان	مقدونيا الشمالية
ألمانيا	الجبل الأسود	غابون	المكسيك
الإمارات العربية المتحدة	الجزائر	غامبيا	ملاوي
أنتيغوا وبربودا	جزر البهاما	غانا	المملكة العربية السعودية
إندونيسيا	جزر القمر	غرينادا	المملكة المتحدة لبريطانيا
أنغولا	جزر مارشال	غواتيمالا	العظمى وأيرلندا الشمالية
أوروغواي	جمهورية أفريقيا الوسطى	غيانا	منغوليا
أوزبكستان	الجمهورية التشيكية	غينيا	موريتانيا
أوغندا	الجمهورية الدومينيكية	فانواتو	موريشيوس
أوكرانيا	الجمهورية العربية السورية	فرنسا	موزامبيق
إيران، (جمهورية - الإسلامية)	جمهورية الكونغو الديمقراطية	الفلبين	موناكو
آيرلندا	جمهورية تنزانيا المتحدة	فنزويلا، (جمهورية - البوليفارية)	ميانمار
آيسلندا	جمهورية كوريا	فنلندا	ناميبيا
إيطاليا	جمهورية لاو	فيجي	النرويج
بابوا غينيا الجديدة	الديمقراطية الشعبية	فيت نام	النمسا
باراغواي	جمهورية مولدوفا	قبرص	نيبال
باكستان	جنوب أفريقيا	قطر	النيجر
بالاو	جورجيا	قيرغيزستان	نيجيريا
البحرين	جيبوتي	كابو فيردي	نيكاراغوا
البرازيل	الدانمرك	كازاخستان	نيوزيلندا
بربادوس	دومينيكا	الكاميرون	هايتي
البرتغال	رواندا	الكرسي الرسولي	الهند
بروناي دار السلام	رومانيا	كرواتيا	هندوراس
بلجيكا	زامبيا	كمبوديا	هنغاريا
بلغاريا	زمبابوي	كندا	هولندا، (مملكة -)
بليز	ساموا	كوبا	الولايات المتحدة الأمريكية
بنغلاديش	سان مارينو	كوت ديفوار	اليابان
بنما	سانت فنسنت وجزر غرينادين	كوستاريكا	اليمن
بنن	سانت كيتس ونيفس	كولومبيا	اليونان
بوتسوانا	سانت لوسيا	الكونغو	
بورкина فاسو	سري لانكا	الكويت	
بوروندي	السلفادور	كينيا	

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. ويتمثل هدف الوكالة الدولية للطاقة الذرية الرئيسي في "تسهيل وتوسيع مساهمة الطاقة الذرية في السلام والصحة والازدهار في العالم أجمع".

ملاحظة بشأن حقوق النشر

جميع المنشورات العلمية والتقنية الصادرة عن الوكالة محمية بموجب الاتفاقية العالمية لحقوق التأليف والنشر بصيغتها المعتمدة في عام 1952 (جنيف) والمنقحة في عام 1971 (باريس). وقد عمدت المنظمة العالمية للملكية الفكرية (جنيف) لاحقاً إلى توسيع نطاق حقوق التأليف والنشر لتشمل الملكية الفكرية الإلكترونية والفرضية. ويجوز اشتراط الحصول على إذن لاستخدام النصوص الواردة في منشورات الوكالة بشكلها المطبوع أو الإلكتروني، استخداماً كلياً أو جزئياً. ويرجى الاطلاع على الموقع الإلكتروني www.iaea.org/publications/rights-and-permissions للحصول على مزيد من التفاصيل. ويمكن توجيه الاستفسارات إلى العنوان التالي:

Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
tel.: +43 1 2600 22529 or 22530
email: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/ar/almanshurat

حقوق النشر محفوظة للوكالة الدولية للطاقة الذرية، 2024
طُبِعَ من قِبَلِ الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا،
تشرين الأول/أكتوبر، 2024

STI/PUB/2099

ISBN 978-92-0-628624-1 | PDF 978-92-0-628724-8 | EPUB 978-92-0-628824-5

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

ملحوظة تحريرية

على 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.

ولا يتناول هذا المنشور مسائل تتعلق بالمسؤولية، قانونية كانت أم غير قانونية، عن أفعال أو الامتناع عن أفعال من جانب أي شخص.

وتمثل الإرشادات والتوصيات المقدمة هنا فيما يتعلق بالممارسات الجيدة المحددة آراء الخبراء ولكنها غير مستندة إلى توافق في آراء جميع الدول الأعضاء.

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

وذكر أسماء شركات أو منتجات معينة (سواء مع الإشارة إلى أنها مسجلة أو دون تلك الإشارة) لا يعني ضمناً وجود أي نية لانتهاك حقوق الملكية، كما لا ينبغي أن يُفسر على أنه تأييد أو توصية من جانب الوكالة.

ولا تتحمل الوكالة أي مسؤولية عن استمرارية أو دقة الوصلات الإلكترونية للمواقع الشبكية الخاصة بطرف خارجي أو طرف ثالث المشار إليها في هذا الكتاب ولا تضمن أن يكون، أو أن يظل، أي محتوى يرد في تلك المواقع الشبكية دقيقاً أو ملائماً.

يهدف هذا المنشور المعنون "العناصر الأساسية للاندماج" إلى تحديد معالم رؤية مشتركة لتطوير طاقة الاندماج. ويضع المنشور فهماً مشتركاً لمسار الانتقال من مرحلة البحث والتطوير والإيضاح إلى مرحلة الاستغلال التجاري، ويرسم إطاراً تعاونياً للمساعدة على الحفاظ على استمرارية المبادرات المعنية بطاقة الاندماج على الصعيد العالمي وتقدم العمل فيها. ويشمل الجمهور المستهدف بهذا المنشور علماء البحوث والمهندسين المشاركين في جهود البحث والتطوير المتعلقة بالاندماج، بالإضافة إلى الرقابيين، ورواد الأعمال وغيرهم من الجهات المعنية المشاركة في تطوير تكنولوجيا الاندماج، وواضعي السياسات.