IAEA BULLETIN

مجلة الوكالة الدولية للطاقة الذرِّية

منشور الوكالة الرئيسي | أيار/ مايو ٢٠٢١ | www.iaea.org/bulletin

طاقة الاندماج

ما هو الاندماج، ولماذا من الصعب جدًّا تحقيقه؟ الصفحة ٤

المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير): أكبر تجربة اندماج في العالم، الصفحة ١٠

توحيد جهود البلدان من خلال البحوث والتعاون في مجال الاندماج، الصفحة ٢٢

IAEA

تكمن مهمَّة الوكالة الدولية للطاقة الذرِّية في منع انتشار الأسلحة النووية ومساعدة كلِّ البلدان، لا سيَّما في العالم النامي، على الاستفادة من استخدام العلوم والتكنولوجيا النووية استخداماً سلميًّا ومأموناً وآمناً.

وقد تأسَّست الوكالةُ بصفتها منظمةً مستقلَّةً في إطار الأمم المتحدة في عام ١٩٥٧، وهي المنظمة الوحيدة ضمن منظومة الأمم المتحدة التي تملك الدراية في مجال التكنولوجيات النووية. وتساعد مختبراتُ الوكالة المتخصِّصة الفريدة من نوعها على نقل المعارف والدراية إلى الدول الأعضاء في الوكالة في مجالات مثل الصحة البشرية والأغذية والمياه والصناعة والبيئة.

وتقوم الوكالةُ كذلك بدور المنصَّة العالمية لتعزيز الأمن النووي. وقد أسَّست الوكالةُ سلسلةَ الأمن النووي الخاصة بالمنشورات الإرشادية المتوافق عليها دوليًّا بشأن الأمن النووي. كما تركِّز أنشطةُ الوكالة على تقديم المساعدة للتقليل إلى الحدِّ الأدنى من مخاطر وقوع المواد النووية وغيرها من المواد المشعَّة في أيدي الإرهابيين والمجرمين، أو خطر تعرُّض المرافق النووية لأعمال كيدية.

وتوفِّر معاييرُ الأمان الصادرة عن الوكالة نظاماً لمبادئ الأمان الأساسية، وتجسِّد توافقاً دوليًّا في الآراء حول ما يشكِّل مستوىً عالياً من الأمان لحماية الناس والبيئة من التأثيرات الضارَّة للإشعاعات المؤيِّنة. وقد وُضِعت معاييرُ الأمان الخاصة بالوكالة لتطبيقها في جميع أنواع المرافق والأنشطة النووية التي تُستخدَم للأغراض السلمية، وكذلك لتطبيقها في الإجراءات الوقائية الرامية إلى تقليص المخاطر الإشعاعية القائمة.

وتتحقَّق الوكالةُ أيضاً، من خلال نظامها التفتيشي، من امتثال الدول الأعضاء للالتزامات التي قطعتها على نفسها بموجب معاهدة عدم انتشار الأسلحة النووية وغيرها من اتفاقات عدم الانتشار، والمتمثِّلة في عدم استخدام المواد والمرافق النووية إلَّا للأغراض السلمية.

ولعمل الوكالة جوانب متعدِّدة، وتشارك فيه طائفةٌ واسعةٌ ومتنوِّعةٌ من الشركاء على الصعيد الوطني والإقليمي والدولي. وتُحدَّد برامجُ الوكالة وميزانياتها من خلال مقرَّرات جهازَيْ تقرير سياسات الوكالة، أيْ مجلس المحافظين المؤلَّف من ٣٥ عضواً والمؤتمر العام الذي يضمُّ جميعَ الدول الأعضاء.

ويوجد المقرُّ الرئيسي للوكالة في مركز فيينا الدولي. كما توجد مكاتب ميدانية ومكاتب اتصال في تورونتو وجنيف وطوكيو ونيويورك. وتدير الوكالةُ مختبراتٍ علميةً في كلٍّ من زايبرسدورف وفيينا وموناكو. وعلاوةً على ذلك، تدعم الوكالةُ مركز عبد السلام الدولي للفيزياء النظرية في تريستي بإيطاليا وتوفِّر له التمويلَ اللازم.

مجلة الوكالة الدولية للطاقة الذرِّية

يصدرها مكتب الإعلام العام والاتصالات
الوكالة الدولية للطاقة الذرِّية
مركز فيينا الدولي

International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100, 1400 Vienna, Austria
الهاتف: ٢٦٠٠٠ (١-٤٣)
البريد الإلكتروني: iaeabulletin@iaea.org

مدير التحرير: مايكل أمدي مادسن
المحرِّر: ميكلوس غاسبر
التصميم والإنتاج: ريتو كين

مجلة الوكالة متاحة على الموقع التالي:
www.iaea.org/bulletin

يمكن استخدام مقتطفات من مواد الوكالة التي تتضمَّنها مجلة الوكالة في مواضع أخرى بِحُرِّية، شريطة الإشارة إلى مصدرها. وإذا كان مبيَّناً أنَّ الكاتب من غير موظفي الوكالة، فيجب الحصول منه أو من المنظمة المصدِرة على إذن بإعادة النشر، ما لم يكن ذلك لأغراض الاستعراض.

ووُجهات النظر المعرَب عنها في أيِّ مقالة موقَّعة واردة في مجلة الوكالة لا تُمثِّل بالضرورة وجهةَ نظر الوكالة الدولية للطاقة الذرِّية، ولا تتحمَّل الوكالةُ أيَّ مسؤولية عنها.

الغلاف:
جزيئات من البلازما — تمَّ تسخينها لتصل إلى مئات الملايين من درجات الحرارة وتمَّ احتواؤها بحقول مغناطيسية — لتندمج معاً في جهاز توكاماك فتنتج الطاقة.
(Shutterstock.com)

تابعونا على

المساعدة على جعل الاندماج حقيقة واقعة

بقلم رافائيل ماريانو غروسي، المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرِّية

عندما حضر كبار مسؤولي الوكالة مؤتمرَ الأمم المتحدة الدولي الثاني لاستخدام الطاقة الذرية في الأغراض السلمية في عام ١٩٥٨، وقفوا شاهدين على الكشف عن المحاولات التي كانت تعتبر حتى آنذاك من أسرار الدول، والتي قامت بها البلدان لتسخير قوة الاندماج النووي. ووفقاً لتلك المعلومات التي كُشف عنها، فقد قدَّم الاندماج وعوداً بتزويد المجتمع بطاقة تكاد تكون بلا حدود. ويتطلب الاندماج اجتماع النوى بعضها مع بعض في عملية تُطلِق من نفس كمية الوقود طاقةً أكثر بكثير من الطاقة المستمدة من عملية الانشطار النووي، التي تنقسم فيها الذرات.

وفي أواخر خمسينات القرن العشرين، عندما كان مستقبل الوقود الأحفوري لا يزال يبدو بلا حدود وعندما لم يخضع تغيُّر المناخ بعدُ للدراسة، كان يُنظر إلى الاندماج على أنه 'شيء من الجيد الحصول عليه': أي كرؤية لتوليد الطاقة في المستقبل البعيد. فكيف يختلف العالم الذي نعيش فيه اليوم عما كان عليه، علماً بأن الطلب على الطاقة النظيفة يفوق العرض. إنَّ هذا الأمر جعل المصادر النظيفة للطاقة، مثل الاندماج، تحظى بالأهمية لدى صانعي السياسات والمستثمرين والجمهور الأوسع.

فالاندماج يولِّد طاقة لكل كيلوغرام واحد من الوقود أكبر بأربعة أضعاف من الطاقة التي يولِّدها الانشطار، وأكبر بحوالي أربعة ملايين ضعف من الطاقة التي تولَّد من حرق النفط والفحم. والمستوى الحالي للالتزام الدولي يقرِّبنا أكثر من أي وقت مضى من مستقبل الاندماج.

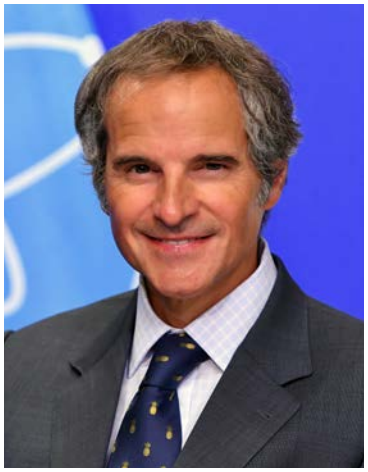
ومن الأمثلة الرئيسية على ذلك المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير)، وهو أكبر تجربة اندماج في العالم (انظر المقالة، الصفحة ١٠)، حيث يتَّحدُ علماء من ٣٥ بلداً في مسيرة نحو السعي لتحقيق تفاعل اندماج ذاتي الاستدامة. والعمل جار على بناء هذا المفاعل، وعند الانتهاء من أعمال البناء، فإنَّ مفاعل إيتير يبشِّر بالدخول في المرحلة التالية من تطوير طاقة الاندماج — أي بناء محطات قوى الاندماج الإيضاحية، والمعروفة أيضا بمحطات DEMO، التي تهدف إلى إنتاج الكهرباء من الاندماج للمرة الأولى.

والوكالة هي في طليعة العاملين على تطوير البرنامج الإيضاحي DEMO، حيث إنها تعمل على تيسير التنسيق الدولي وتتقاسم أفضل الممارسات في المشاريع على الصعيد العالمي (انظر المقالة، الصفحة ١٢). وتشجِّع الوكالة على إجراء المناقشات بشأن محطات DEMO والارتقاء بالحوار الدولي على نطاق واسع، بغية التغلب على التحديات التقنية للغاية وجعل طاقة الاندماج حقيقة واقعة.

ومجلة «Nuclear Fusion» (الاندماج النووي)، وهي مجلة علمية تنشرها الوكالة، تقف شاهدة على التزامنا ببحوث الاندماج. إنها مجلة الاندماج الأطول عمراً والأكثر موثوقية في العالم. وهي تدعم الباحثين والمهندسين في مجال الاندماج على الصعيد العالمي، وتُنزَّل نصوصها الكاملة نصف مليون تنزيل كل عام، وهي باستمرار المجلة الأكثر تأثيراً في مجال الاندماج.

إننا نعرض في هذه المجلة الجهود التي تبذلها الحكومات والمشاركة المتزايدة للقطاع الخاص في الاندماج. ويبيِّن تزايد الاهتمام من جانب المستثمرين ومنتجي الطاقة الرئيسيين أنَّ وتيرة التطورات التقنية اللازمة لجعل الاندماج حقيقة واقعة آخذة في التسارع.

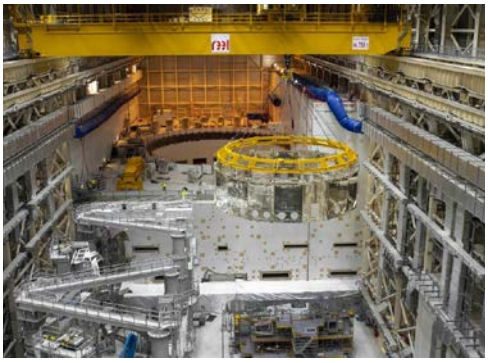
وعلى حد تعبير ليف أرتسيموفيتش، وهو عالم فيزيائي شهير في العهد السوفياتي، «سيكون الاندماج جاهزاً عندما يحتاج إليه المجتمع.» وها قد حان وقت الحاجة إليه الآن. فقد أصبح التصدي لتغير المناخ أولوية عالمية، وإزالة الكربون من مصادرنا المتاحة للطاقة هي واحدة من أهم مهامنا. وتسخير طاقة الاندماج يزوِّد البشرية بمستقبل طاقة نظيفة أقرب من أي وقت مضى.



"إنَّ المستوى الحالي من الالتزام الدولي يقرِّبنا أكثر من أي وقت مضى من مستقبل الاندماج."

— رافائيل ماريانو غروسي، المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية

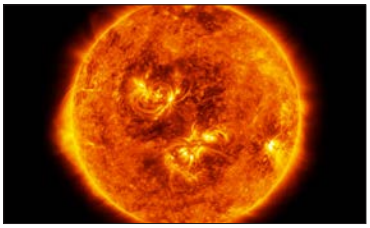
(الصورة من: مفاعل إيتير)



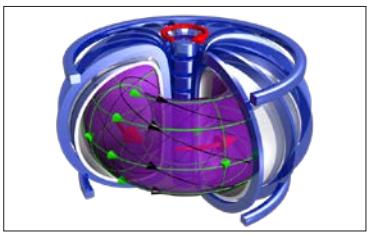
(الصورة من: مفاعل إيتير)

(الصورة من: Freepik.com)

١ المساعدة على جعل الاندماج حقيقة واقعة



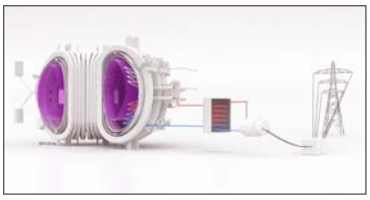
٤ ما هو الاندماج، ولماذا من الصعب جدًّا تحقيقه؟



٦ الاندماج بالاحتواء المغناطيسي باستخدام أجهزة توكاماك وسِتلَّلاريتُور

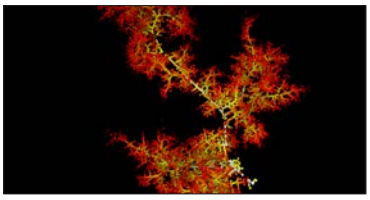
٨ استكشاف بدائل للاحتواء المغناطيسي

١٠ المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير): أكبر تجربة اندماج في العالم



١٢ محطات قوى الاندماج الإيضاحية
خطوة إلى الأمام نحو إنتاج الكهرباء على نطاق واسع وتجاري

١٤ الأمان في الاندماج
عملية آمنة بطبيعتها



١٦ كيف تساعد قواعد بيانات الوكالة على المضي قُدماً بالبحوث من أجل التوصل إلى استخدام الاندماج استخداماً تجاريًّا

١٨ البلازما المتأجِّجة

خطوة حاسمة الأهمية على طريق توليد قوى الاندماج

٢٠ سد الثغرات في المواد والتكنولوجيات المستخدمة في الاندماج

٢٢ توحيد جهود البلدان من خلال البحوث والتعاون في مجال الاندماج

أسئلة وأجوبة

٢٤ الاندماج: سيكون جاهزاً حين يحتاجه المجتمع

رؤية عالمية

٢٦ بين السعي إلى السبق والأداء المضمون

لهذه الأسباب يحتاج الاندماج للمشاريع الريادية والشركات الناشئة

— بقلم سايمون وودرف

تحديثات الوكالة

٢٨ أخبار الوكالة

٣٢ المنشورات

ما هو الاندماج، ولماذا من الصعب جدًّا تحقيقه؟

بقلم إيرينا شاتزيس وماتيو باربارينو

قبل خمسمائة عام، كان ثمة اعتقاد سائد في حضارة الأزتك، التي ازدهرت في الموقع الذي توجد فيه المكسيك اليوم، بأنَّ الوقود الذي يغذِّي الشمس وجميعَ القوى المنبعثة منها هو دماء القرابين البشرية. أما اليوم، فنحن نعلم أنَّ الشمس وسائر النجوم تستمدُّ طاقتها من تفاعلٍ يُعرف باسم الاندماج النووي. وفي حال أمكن استنساخ الاندماج النووي على كوكب الأرض، يمكن أن يؤدي ذلك إلى توفير طاقة لا حدود لها تقريباً من الناحية العملية وتتَّسم بكونها نظيفة ومأمونة وميسورة التكلفة لتلبية الطلب على الطاقة على الصعيد العالمي.

إذاً، كيف يتم الاندماج النووي بالضبط؟ ببساطة، الاندماج النووي هو العمليةُ التي تندمج على إثرها نواتان ذريتان خفيفتان لتكوِّنا نواة ذرية واحدة أثقل وزناً، ويصاحب هذه العملية انبعاث كميات هائلة من الطاقة. وتحدث تفاعلات الاندماج عندما تكون المواد في حالة تُسمى بحالة البلازما — وهي حالة تتَّخذ المادة فيها شكل غاز ساخن مشحون مكوَّن من أيونات موجبة وإلكترونات طليقة، وتتَّسم بخصائص فريدة تميِّزها عن الحالات الصلبة والسائلة والغازية.

ولكي يقع الاندماج في قلب الشمس التي تشرق على كوكبنا، يتطلب الأمر تصادُم النويات بعضها ببعض في درجات حرارة عالية جدًّا تتجاوز عشرة ملايين درجة مئوية تمكِّنها من التغلُّب على التنافر الكهربائي فيما بينها. فإذا تغلَّبت النويات على هذا التنافر وصارت المسافات بينها قريبة للغاية، تبلغ قوة التجاذب النووي بينها مستوى يفوق التنافر الكهربائي بما يتيح لها أن تندمج معاً. ولكي يحصل ذلك، يجب احتواء النويات داخل حيِّز صغير لزيادة فرص التصادُم. وتتحقَّق الظروف اللازمة لعملية الاندماج في قلب الشمس بسبب مستوى الضغط البالغ الارتفاع الذي ينتج عن جاذبية الشمس الهائلة.

ويسفر الاندماج عن إنتاج كمية ضخمة من الطاقة — تبلغ أربعة أضعاف كمية الطاقة التي تنتج عن تفاعلات الانشطار النووي — ويمكن للتفاعلات الاندماجية أن تكون الأساس الذي تقوم عليه مفاعلات القوى الاندماجية في المستقبل. وبحسب الخطط القائمة، فسوف يستخدم الجيل الأول من مفاعلات الاندماج وقوداً مكوَّنًا من مزيج من الديوتيريوم والتريتيوم — وهما نوعان من الهيدروجين الثقيل. ومن الناحية النظرية فباستخدام بضعة غرامات فقط من هذين المتفاعلَيْن يمكن إنتاج كمية من الطاقة تبلغ تيراجول واحد، وهي تقريباً كمية الطاقة التي تكفي لتلبية احتياجات شخص واحد من سكان البلدان المتقدِّمة النمو لفترة تزيد على ستين عاماً.

التطلُّع إلى النجوم

في حين أنَّ قوة جاذبية الشمس الهائلة تؤدي إلى حدوث الاندماج بشكل طبيعي، فمن دون هذه القوة يتطلب وقوع التفاعل درجة حرارة أعلى. وعلى كوكب الأرض، نحتاج إلى درجات حرارة تتجاوز ١٠٠ مليون درجة مئوية وضغطاً شديداً لجعل الديوتيريوم والتريتيوم يندمجان، كما نحتاج إلى توفير الاحتواء الكافي لاحتجاز البلازما والإبقاء على تفاعل الاندماج متواصلاً لفترة كافية لتحقيق كسب صاف في القوى، أي مكسب في النسبة بين قوى الاندماج المنتَجة إلى القوى المستخدمة لتسخين البلازما.

وفي حين أنَّ التجارب التي تُجرى الآن تشهد بصورة روتينية تحقيق ظروف قريبة للغاية من الظروف المطلوب توافرها في مفاعلات الاندماج، فهناك حاجة إلى تحسين احتواء البلازما واستقرارها. ويواصل العلماء والمهندسون في شتى أنحاء العالم اختبار مواد جديدة وتصميم تكنولوجيات جديدة من أجل تحقيق طاقة الاندماج على أرض الواقع.

تستمدُّ الشمس وسائر النجوم طاقتها من تفاعلٍ يُعرف بالاندماج النووي. وفي حال أمكن استنساخ هذا التفاعل على كوكب الأرض، يمكن أن يؤدي ذلك إلى توفير طاقة لا حدود لها تقريباً وتتَّسم بكونها نظيفة ومأمونة وميسورة التكلفة لتلبية الطلب العالمي على الطاقة.

(الصورة من: جهاز تصوير الغلاف الجوي بمرصد ديناميات الشمس التابع لناسا)

وهناك بحوثٌ جارية بشأن الاندماج النووي وفيزياء البلازما في أكثر من ٥٠ بلداً، وتحققت تفاعلات الاندماج بنجاح في العديد من التجارب، وإن جرى ذلك دون إثبات تحقيق كسب صاف في القوى. وستتوقف المدة التي سيستغرقها استنساخ هذه العملية التي تستأثر بها النجوم على حشد الموارد من خلال إقامة الشراكات والتعاون على الصعيد العالمي.

تاريخ حافل بالتعاون

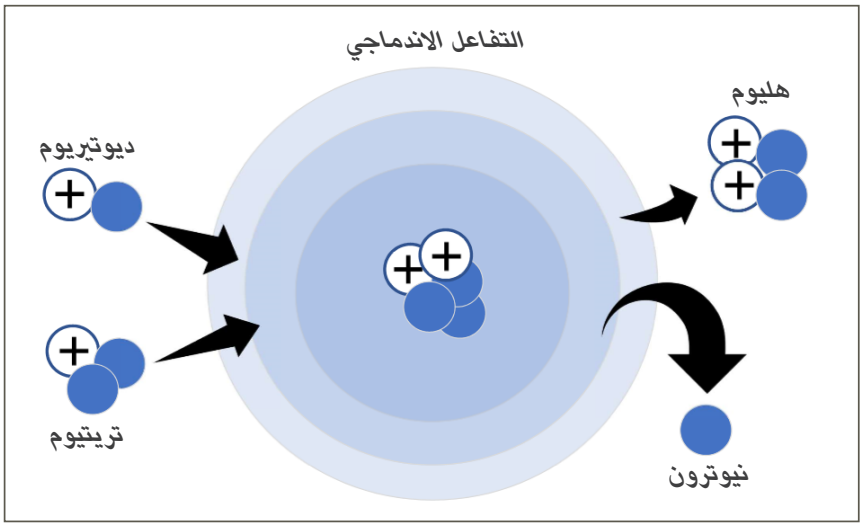
منذ أن توصَّل العلم إلى فهم الاندماج النووي في ثلاثينات القرن الماضي، انخرط العلماء في مساع لاستنساخه وتسخير الطاقة الناتجة عنه. وفي بداية الأمر، جرت هذه المحاولات في كنف السرية. بيد أنه سرعان ما اتضح أنَّ هذه البحوث المعقَّدة والمُكلفة لايمكن إجراؤها إلا من خلال التعاون. وخلال مؤتمر الأمم المتحدة الدولي الثاني المعني بالاستخدامات السلمية للطاقة الذرية الذي عُقِدَ في عام ١٩٥٨ في جنيف بسويسرا، كشف العلماء أمام العالم عن البحوث الجارية في مجال الاندماج النووي.

وقد كانت الوكالة ولا تزال في موقع القلب من البحوث الدولية في مجال الاندماج. فقد أطلقت الوكالة مجلة الاندماج النووي في عام ١٩٦٠ لتبادل المعلومات حول التقدّم المحرز في مجال الاندماج النووي، وتُعتبر هذه المجلة اليوم الدورية الرائدة في هذا المجال. وعُقِدَ مؤتمر الوكالة الدولي الأول المعني بطاقة الاندماج في عام ١٩٦١، ومنذ عام ١٩٧٤، تعقد الوكالة كل سنتين مؤتمراً لتعزيز النقاش بشأن التطورات والانجازات في هذا المجال.

وبعد عقدين من المفاوضات بشأن تصميم ومكان أكبر مرفق دولي للاندماج على الصعيد العالمي، أُنشِئ مفاعل إيتير في عام ٢٠٠٧ في فرنسا، بهدف إثبات إمكانية إنتاج طاقة الاندماج من الناحية العلمية والتكنولوجية (انظر المقالة، الصفحة ١٠). والمدير العام للوكالة هو وديع اتفاق التنفيذ المشترك لمفاعل إيتير. وفيما بعد مفاعل إيتير، يجري التخطيط لإنشاء محطات لإثبات جدوى القوى الاندماجية، أو ما يُعرف بمحطات القوى الإيضاحية، بهدف إثبات إمكانية توليد مكسب صاف من القوى الكهربائية باستخدام الاندماج النووي الخاضع للتحكُّم. وتستضيف الوكالة حلقات عمل بشأن محطات القوى الإيضاحية لتيسير التعاون من أجل تحديد وتنسيق أنشطة البرامج العادية لهذه المحطات حول العالم (انظر المقالة، الصفحة ١٢).

ومن المتوقع أنَّ الاندماج يمكن أن يلبي احتياجات البشرية من الطاقة لملايين السنين. ووقود الاندماج متوفر بكثرة ومن السهل الحصول عليه: فالديوتيريوم يمكن استخراجه بتكلفة زهيدة من مياه البحر، أمَّا التريتيوم فيمكن إنتاجه من الليثيوم الموجود بوفرة في البيئة الطبيعية. ولن تَنْتُج عن مفاعلات الاندماج في المستقبل نفايات نووية قوية الإشعاع وطويلة العمر، أمَّا انصهار القلب فهو أمرٌ مستحيل عمليًّا في مفاعلات الاندماج.

ومن الجدير بالذكر أنَّ الاندماج النووي لا تنجم عنه انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون أو غيره من غازات الدفيئة إلى الغلاف الجوي، ومن ثمَّ يمكن للاندماج النووي أن يؤدي، إلى جانب الانشطار النووي، دوراً في التخفيف من حدَّة تغير المناخ في المستقبل باعتبارهما من مصادر الطاقة المنخفضة الكربون.



سوف يُستخدم خليط من الديوتيريوم والتريتيوم — وهما من نظائر الهيدروجين — كوقود لمحطات القوى الاندماجية في المستقبل. وداخل المفاعل، تتصادم نويات الديوتيريوم والتريتيوم وتندمج، فتنبعث على إثر هذه العملية ذرات هليوم ونيوترونات.

(الصورة من: ماتيو باربارينو/الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

الاندماج بالاحتواء المغناطيسي باستخدام أجهزة توكاماك وسِتلَّلاريتُور

بقلم فولفغانغ بيكو

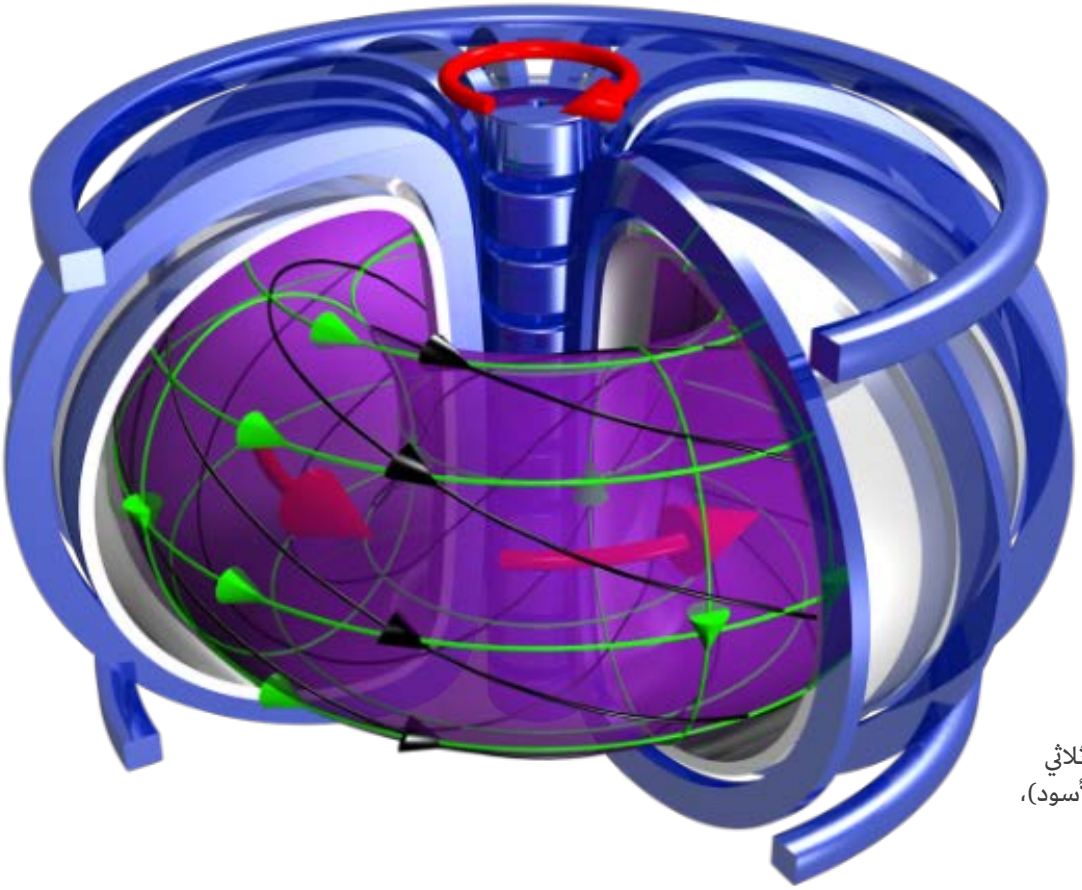
تمَّ التوصل إلى تفاعلات الاندماج الأولى في المختبر في عام ١٩٣٤، واعتُبر ذلك إنجازاً رئيسيًّا آنذاك. أما اليوم، فليس من الصعب بوجه خاص التوصل إلى تفاعل الاندماج: ففي عام ٢٠١٨، دخل طفل يبلغ من العمر اثني عشر عاماً موسوعة غينيس للأرقام القياسية كأصغر شخص ينجح في إحداث تجربة اندماج في المنزل.

ولسوء الحظ، فإن مثل هذه التجارب تنتج انفجارات تدوم فقط أجزاء من الثواني، والتوصل إلى تفاعلات الاندماج هذه وجعلها تدوم لفترات طويلة لا يزال يمثِّل تحدياً كبيراً. ولا يمكن للاندماج أن يصبح من مصادر الطاقة المجدية تجاريًّا إلا إذا تسنى استحداث طريقة ثابتة وموثوقة لإنتاج قوى الاندماج.

قوى الاندماج

تستغل قوى الاندماج الطاقة المنبعثة من «اندماج» النوى الذرية الخفيفة. وعندما تندمج جسيمات من هذا النوع، تكون النواة الناتجة أخف قليلا من مجموع النوى الأصلية. ويتحول الفرق إلى طاقة بدل أن يختفي. ومن المثير للدهشة أنَّ هذه الخسارة الصغيرة في الكتلة تُترجَم إلى كمية هائلة من الطاقة تجعل السعي للحصول على طاقة الاندماج جديراً بالاهتمام للغاية.

وهناك ثلاث حالات للمادة: الصلبة والسائلة والغاز. وإذا تعرض الغاز لدرجات حرارة عالية جدًّا، فإنه يصبح بلازما. وفي البلازما، تتجرَّد الإلكترونات من الذرات. ويقال إن الذرة التي لا توجد بها إلكترونات



كيف يعمل جهاز توكاماك:

يدفع الحقل الكهربائي الناتج عن المحوِّل التيار (السهام الحمراء الكبيرة) عبر عمود البلازما. ويولِّد ذلك حقلاً مغناطيسيًّا حلقيًّا يجعل تيار البلازما ينثني في شكل دائرة (الدائرة العمودية الخضراء). وانثناء العمود في شكل دائرة يمنع التسرب، والقيام بذلك داخل وعاء على شكل كعكة دائرية يخلق فراغاً. ويشار إلى الحقل المغناطيسي الآخر الذي يدور حول طول الكعكة الدائرية على أنه حلقي (الدائرة الأفقية الخضراء).
ويخلق مزيج هذين الحقلين منحنى ثلاثي الأبعاد، مثل الحلزون (يظهر باللون الأسود)، يتم فيه احتواء البلازما بدرجة عالية.

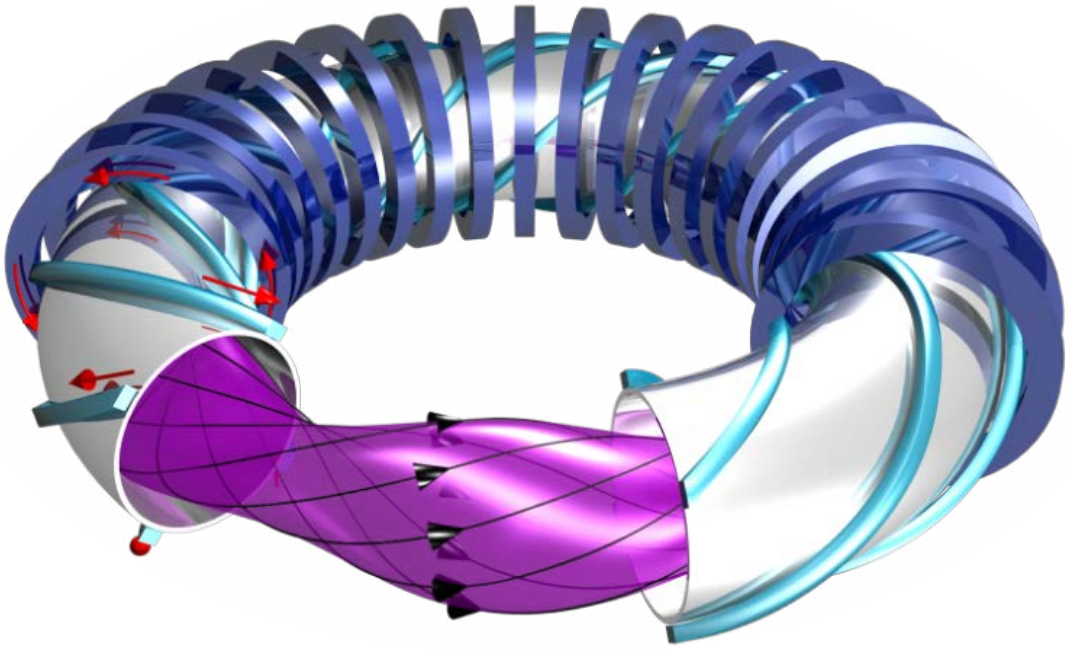
تدور حول النواة هي ذرة مؤيَّنة ويُطلق عليها الأيون. ونتيجة لذلك، فإنَّ البلازما مصنوعة من أيونات وإلكترونات طليقة. وفي هذه الحالة، يمكن للعلماء تحفيز الأيونات لكي تحطِّم بعضها بعضاً فتندمج ثم تطلق الطاقة.

والحفاظ على البلازما في وضع مستقر من أجل استخراج الطاقة أمرٌ صعب. فهي فوضوية وشديدة السخونة وعرضة للاضطرابات وغيرها من حالات عدم الاستقرار. إن فهم البلازما ونمذجتها والتحكم فيها أمر معقد للغاية ولكن الباحثين قطعوا أشواطاً كبيرة في هذا المجال طيلة العقود الماضية.

نفس التحدي وحلول مختلفة

نظراً لأن من الصعب إنشاء أنساق أجهزة سِتللاريتُور، فإنَّ معظم تجارب الاندماج اليوم تستخدم أنساق أجهزة توكاماك (وهي تسمية قصيرة للتعبير الروسي الذي يُترجم إلى 'غرفة حلقية الشكل بملفات مغناطيسية'). ويجري حاليًّا تشغيل نحو ٦٠ جهازاً من نوع توكاماك و١٠ أجهزة من نوع سِتلَّاريتُور.

وكلا النوعين من المفاعلات له مزايا معينة. فبينما تعتبر أجهزة توكاماك أفضل في الحفاظ على البلازما في حالة ساخنة، فإن مفاعلات سِتلَّاريتُور تعتبر أفضل في الحفاظ على البلازما في حالة مستقرة. ورغم انتشار



يمكن لالتواء المغناطيسات أن يُنتج أيضاً شكلاً حلزونيًّا دون حاجة إلى محوِّل، ويسمى هذا النوع من الأنساق السِتلَّاريتُور.

(الصورتان من: معهد ماكس بلانك لفيزياء البلازما، ألمانيا)

ويستخدم العلماء أجهزة الاحتواء المغناطيسي لمناولة البلازما. ومفاعلات الاندماج من ذلك النوع الأكثر شيوعاً هي مفاعلات توكاماك ومفاعلات سِتلَّاريتُور. وفي الوقت الحالي، فإنَّ هذه المفاعلات هي المفاهيم الواعدة أكثر فيما يتعلق بمحطات طاقة الاندماج في المستقبل.

ويستفيد النوعان معاً من المفاعلات من كون الجسيمات المشحونة تتفاعل مع القوى المغناطيسية. ووجود مغناطيس قوي في المفاعلات يبقي الأيونات في حالة احتواء. كما أنَّ الإلكترونات تكون محبوسة بقوى المفاعلات. وتقوم القوى المغناطيسية بتدوير الجسيمات باستمرار حول غرف المفاعل على شكل كعكة دائرية لمنعها من الهروب من البلازما.

أجهزة توكاماك في الوقت الحالي، لا يزال من الممكن أن تصبح أجهزة سِتلّاريتُور في يوم من الأيام الخيار المفضل لمحطات طاقة الاندماج المحتملة.

وقد قطع الباحثون أشواطاً كبيرة في الاندماج بالاحتواء المغناطيسي ويمكنهم الآن بكل سهولة التوصل إلى بلازما ذات درجات حرارة عالية جدًّا. وقد طوروا مغناطيسات قوية للتعامل مع البلازما ومواد جديدة يمكنها تحمُّل الظروف الصعبة في أوعية المفاعلات. وأدى التقدم المحرز في المجال التجريبي والنظري والنمذجة والمحاكاة إلى التوصل إلى فهم أعمق لسلوك البلازما، وستكون أجهزة توكاماك وسِتلَّاريتُور التجريبية من نوع المفاعل إيتير أساسية لإثبات الجدوى العلمية والتقنية لإنتاج طاقة الاندماج.

استكشاف بدائل للاحتواء المغناطيسي

الاندماج بالليزر والأجهزة الخطية وأنواع الوقود المتقدمة

بقلم ألكساندرا بيفا

يعتبر الاندماج بالليزر طريقة لإشعال تفاعلات الاندماج النووي وهو بديل محتمل للاحتواء المغناطيسي (انظر المقالة، الصفحة ٦). وهو يقوم بذلك من خلال الاحتواء بالقصور الذاتي، وذلك باستخدام أشعة الليزر العالية القوى لتسخين وضغط كبسولات كروية صغيرة جدًّا تحتوي على حبيبات وقود مكوَّنة من نظائر الهيدروجين مثل الديوتريوم والتريتيوم.

ويُحدث التسخين الفائق لسطح الكبسولة انفجاراً داخليًّا دقيقاً للوقود، ونتيجة لذلك، تتم إزالة الطبقة السطحية للحبيبات فتنفجر. ويؤدي القصور الذاتي الناجم عن هذه العملية إلى الإبقاء على الوقود في حالة احتواء لفترة كافية لكي تَحدُث تفاعلات الاندماج.

ولقد بدأت التجارب في مجال الاندماج بالليزر في سبعينات القرن العشرين. واليوم، يملك مرفق الإشعال الوطني في مختبر لورانس ليفرمور الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية ١٩٢ من حزم الليزر وهو بكل سهولة أكبر مرفق ليزر في العالم. وفي مرفق الإشعال الوطني، تقوم أشعة الليزر بتسخين الجدران الداخلية لحاوية ذهبية أسطوانية، تسمى الجسم الأسود، وهي تحمل الكبسولة التي تحتوي على حبيبات وقود الديوتريوم-التريتيوم. ويولِّد التفاعل بين الليزر والجسم الأسود أشعة سينية، تسخِّن الكبسولة وتضغطها، مما يخلق بقعة ساخنة مركزية داخل الحبيبة، فتحدث تفاعلات الاندماج.

ولكي يتحقَّق الاشتعال — وهو النقطة التي يصبح فيها الاندماج ذاتي الاستدامة تماماً — يجب أن تطلق كبسولات مرفق الإشعال الوطني طاقة أكثر مما تمتصه بنحو ٣٠ مرة.

وقال براين سبيرز، نائب رئيس قسم النمذجة في الاندماج الاحتوائي بالقصور الذاتي في مرفق الإشعال الوطني: «لقد أحرزنا تقدماً كبيراً في مرفق الإشعال الوطني على مدى السنوات الخمس الماضية، ونحن الآن قادرون على إنتاج طاقة أكثر بضعفين ونصف إلى ثلاثة أضعاف مما وضعناه في النقطة الساخنة من الوقود. ولا يزال هدف تحقيق زيادة قدرها ٣٠ ضعفاً هدفاً رئيسيًّا، ولكنَّ ذلك عملية لا تسير في خط مستقيم، وقد اتخذنا بالفعل العديد من الخطوات التقنية الهامة لتحقيق ذلك الهدف.»

وزيادة الضغط المركزي داخل النقطة الساخنة من الوقود بعدة مليارات من الأضعاف من الضغط الجوي هو الأساس لتحقيق اندماج ذي جدوى من الناحية التجارية. ولقد أحرز مرفق الإشعال الوطني تقدماً كبيراً في هذا المجال من خلال التحول من المواد البلاستيكية إلى البلورات الصغيرة، وكبسولات الكربون العالية الكثافة، وتحسين السمات الهندسية المستخدمة لدعم الكبسولات وتعزيز الهياكل المستخدمة لتعبئة الكبسولة بوقود الاندماج. وسمح ذلك للخبراء بتحقيق زيادة كبيرة في كفاءة اقتران الطاقة من الطاقة التي ينتجها الليزر إلى الطاقة التي تمتصها الكبسولة، وإنتاج المزيد من الطاقة في نهاية المطاف.

وقال سبيرز: «لا تزال هناك تحديات علمية كبرى تنتظرنا، ولكن التطورات الأخيرة التي حصلت في مرفق الإشعال الوطني وغيره من المرافق تثبت أننا نقترب من الوصول إلى عتبة الاشتعال عن طريق الاندماج بالليزر.»

وفي عام ٢٠٢٠، أطلقت الوكالة مشروعاً بحثيًّا منسقاً جديداً بعنوان «مسارات نحو الطاقة انطلاقاً من

الاندماج بالقصور الذاتي: بحوث المواد وتطوير التكنولوجيا». ويركز المشروع، الذي يضم ٢٤ معهداً من ١٧ بلداً، وهو الدفعة الرابعة في سلسلة المشاريع البحثية المنسقة في هذا المجال، على تطوير تصاميم كبسولات عالية الربح للتوصل إلى اندماج ذاتي الاستدامة تماماً.

الاندماج عن طريق اصطدام الحُزم

ثمة بديل آخر لنهج الليزر ونهج الاحتواء المغناطيسي، ألا وهو استخدام الحزم الأيونية الناتجة عن مسرعات الجسيمات واستهداف بعضها لبعض، مع حدوث الاندماج عند نقطة اصطدامها ببعض. والعيب الكبير في هذه الطريقة هو أن احتمال أن ترتد الجسيمات بعضها عن بعض دون اندماجها وإنتاج الطاقة هو احتمال مرتفع.

وتستخدم الشركة الأمريكية الخاصة TAE جهازاً خطيًّا: وهو مفاعل أسطواني طوله ٢٥ متراً. ويتحقق الاندماج عن طريق إطلاق بلازما اثنتين من كل طرف من طرفي المفاعل، فتصطدمان ثم تندمجان لتكونا سحابة في الوسط. ثم تُطلق ذرات الديوتريوم على السحابة لجعلها تدور، ويتم بالتالي الحفاظ على البلازما ساخنة ومستقرة.

من الاحتواء البديل إلى أنواع الوقود المتقدمة

هناك ميزة أخرى للاندماج عن طريق الليزر أو الأجهزة الخطية وتتمثَّل في أنَّ هذه الأساليب يمكن أن تتكيف بسهولة أكبر مع استخدام أنواع الوقود على عكس الديوتريوم والتريتيوم. وقد جرت العادة على استخدام مزيج من نظائر الهيدروجين هذه للتوصل إلى الاندماج لأنها تصل إلى أعلى معدل تفاعل في درجة حرارة أقل من أنواع الوقود الأخرى.

ومع ذلك، فإنَّ التريتيوم مادة مشعة ولا تحدث بشكل طبيعي بأي كميات كبيرة. لذلك، يجب أن تكون قد 'نشأت' في تفاعل نووي بين النيوترونات المولَّدة من الاندماج والليثيوم المحيط بجدار المفاعل. كما أنَّ الطاقة المستمدة من هذه النيوترونات تثير تحديات كبيرة فيما يتعلق بالمواد الموجودة في الوعاء الفراغي للمفاعل، إذ إنَّ النيوترونات عندما تصطدم بجدران المفاعل، تصبح هياكلها ومكوناتها مشعة. وهذا يستلزم مراعاة اعتبارات إضافية في الأمان الإشعاعي والتخلص من النفايات (انظر المقالة، الصفحة ١٤).

وللتغلب على التحديات الناجمة عن استخدام التريتيوم، هناك الآن تجارب تُنفَّذ باستخدام وقود الاندماج البديل أو المتقدم، مثل البروتون-البورون-١١ (p-B-11). والبورون-١١ هو مادة غير مشعة وهو يشكل حوالي ٨٠ في المائة من كامل البورون الموجود في الطبيعة، لذلك فهو متاح بسهولة. ومع ذلك، فإن المشكلة الرئيسية التي تُواجَه في اندماج البروتون-البورون-١١ هي أن ذلك يتطلَّب أن تكون البلازما أكثر سخونة بمائة ضعف من البلازما التي تحتوي على الديوتريوم والتريتيوم. ولحسن الحظ، فمع الإشعال بالليزر أو بالأجهزة الخطية، يتم حبس الحرارة في النقاط الساخنة، دون حاجة إلى أن تكون البلازما ككل أكثر سخونة إلى حد كبير.

وقال ميتشل بيندرباور، كبير الموظفين التنفيذيين في الشركة الأمريكية الخاصة TAE Technologies: «إن البروتون-البورون-١١ هو أنظف مصادر الوقود وأكثرها ملاءمة للبيئة على وجه الأرض، ولا ينطوي على أي منتجات جانبية ضارة وهو يتيح إمدادات طبيعية كافية للحفاظ على كوكب الأرض لآلاف السنين. ويمكن لهذه العوامل مجتمعة أن تزيد إلى أقصى حد من أمان محطات قوى الاندماج واقتصادياتها وكفاءتها وبقائها.» وأضاف «إنَّ الصعوبة الرئيسية التي توجد في تفاعل البروتون-البورون-١١ هو أنه يتطلب درجات حرارة أعلى من دورات الوقود الأخرى لاستدامة تفاعل الاندماج. وقد طوَّرت الشركة الأمريكية الخاصة TAE مفهوم الاحتواء البديل لمواجهة هذا التحدي.»

وبالتالي يمكن لأنواع الوقود المتقدمة أن توفر طريقة أكثر فعالية وكفاءة لإنتاج طاقة الاندماج في المستقبل.

مسؤولان عن تشغيل مرفق الإشعال الوطني يفحصان عملية تجميع نهائي للبصريات خلال فترة صيانة روتينية. ويعتبر مرفق الإشعال الوطني أكبر وأعلى نظام ليزر للطاقة في العالم وهو يوجد في مختبر لورانس ليفرمور الوطني.

(الصورة من: مختبر لورانس ليفرمور الوطني)

المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير): أكبر تجربة اندماج في العالم

بقلم فولفغانغ بيكو

يبلغ وزن المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير) ٢٣٠٠٠ طن وطوله قرابة ٣٠ متراً مما سيجعله مشهداً مثيراً للإعجاب. وسيقع مفاعل الاندماج النووي هذا وسط موقع تبلغ مساحته ١٨٠ هكتاراً، إلى جانب مساكن ومعدات إضافية. وسوف يتجاوز الحجم الهائل لمفاعل إيتير، وهي كلمة لاتينية تعني «الطريق»، إلى حد كبير حجم أكبر مفاعلات الاندماج التجريبية التي تعمل حاليًّا — أي الطارة الأوروبية المشتركة في المملكة المتحدة وجهاز JT-60SA الأوروبي الياباني المشترك في اليابان.

ولكن ما هي إمكانات مفاعل إيتير، وفي عصر التصغير والاستخدام الأمثل، لماذا من الضروري بناء جهاز بحوث على هذا النطاق الهائل؟

إنَّ أحد الأهداف الرئيسية لمفاعل إيتير هو إثبات أن تفاعلات الاندماج يمكن أن تنتج طاقة أكثر بكثير من الطاقة التي تُورَّد لبدء عملية التفاعل — مما يؤدي إلى تحقيق مكسب شامل في القوى. وتسمى المفاعلات من نوع مفاعل إيتير مفاعلات توكاماك (انظر المقالة، الصفحة ٦)، وهي تستخدم مزيجاً من نظم التسخين والمغناطيسات القوية وغيرها من الأجهزة لإحداث تفاعلات الاندماج التي تطلق الطاقة في أنواع البلازما الفائقة الحرارة. وتربط الحقول المغناطيسية الناتجة الجسيمات المشحونة حول وعاء المفاعل على شكل كعكات دائرية وتدور حولها بحيث يمكن لهذه الجسيمات أن تندمج وتنتج طاقة الاندماج.

أما بالنسبة لمسألة الحجم، فإن مفاعلات توكاماك الأكبر حجما توفر عزلاً أفضل وتؤدي إلى احتواء جسيمات الاندماج لفترة أطول، فتنتج طاقة أكثر من الطاقة التي تنتجها الأجهزة الأصغر.

ومن المؤشرات الهامة لأداء أي مفاعل هو تحقيقه مكاسب في قوى الاندماج، أو النسبة بين قوة الاندماج المنتجة والقوى المحقونة في البلازما لإحداث التفاعل. ويعبر عن ذلك بالرمز 'Q'.

وحتى الآن، حققت الطارة الأوروبية المشتركة أفضل مكسب، بتسجيل قيمة Q بلغت ٠,٦٧، من خلال إنتاج ١٦ ميغاواطًا من قوى الاندماج من ٢٤ ميغاواطًا من قوى التسخين. ومع ذلك، ستكون هناك حاجة إلى وجود قيم Q أعلى بكثير لإنتاج الكهرباء.

الشروط الأساسية للقوى

على مدى السنوات الخمسين الماضية من تجارب الاندماج، زاد أداء أجهزة الاندماج بعامل ١٠٠٠٠٠، ولكن هناك حاجة إلى زيادة أخرى بعامل ٥ للوصول إلى مستوى الأداء الذي تحتاجه محطة القوى. ولتحقيق ذلك، يعمل الباحثون على تحقيق المستوى الأمثل لظروف البلازما من خلال إحداث تغييرات في درجة الحرارة والكثافة ووقت الاحتواء (انظر المقالة، الصفحة ٨).

وقد تحققت بعض هذه التحسينات لأن مفاعلات الاندماج التجريبية أصبحت أكبر حجماً. ونظراً لأن طول مفاعل إيتير وشعاعه أكبر بضعفين من طول وشعاع الطارة الأوروبية المشتركة، فإن حجم البلازما الخاصة به سيزيد عشرة أضعاف. وبتطبيق تصاميم جديدة ومواد مبتكرة، فإنَّ مفاعل إيتير سوف يضمُّ أيضاً بعضاً من أقوى أجهزة تسخين البلازما التي استُخدمت على الإطلاق. ومع حقن قوة تسخين تبلغ ٥٠ ميغاواطًّا فقط في البلازما، فإن الهدف هو إنتاج ٥٠٠ ميغاواط من قوى الاندماج — مما يعطي قيمة Q لا تقل عن ١٠ — في نبضات يتراوح طول كل منها بين ٥ و١٠ دقائق تقريبا.

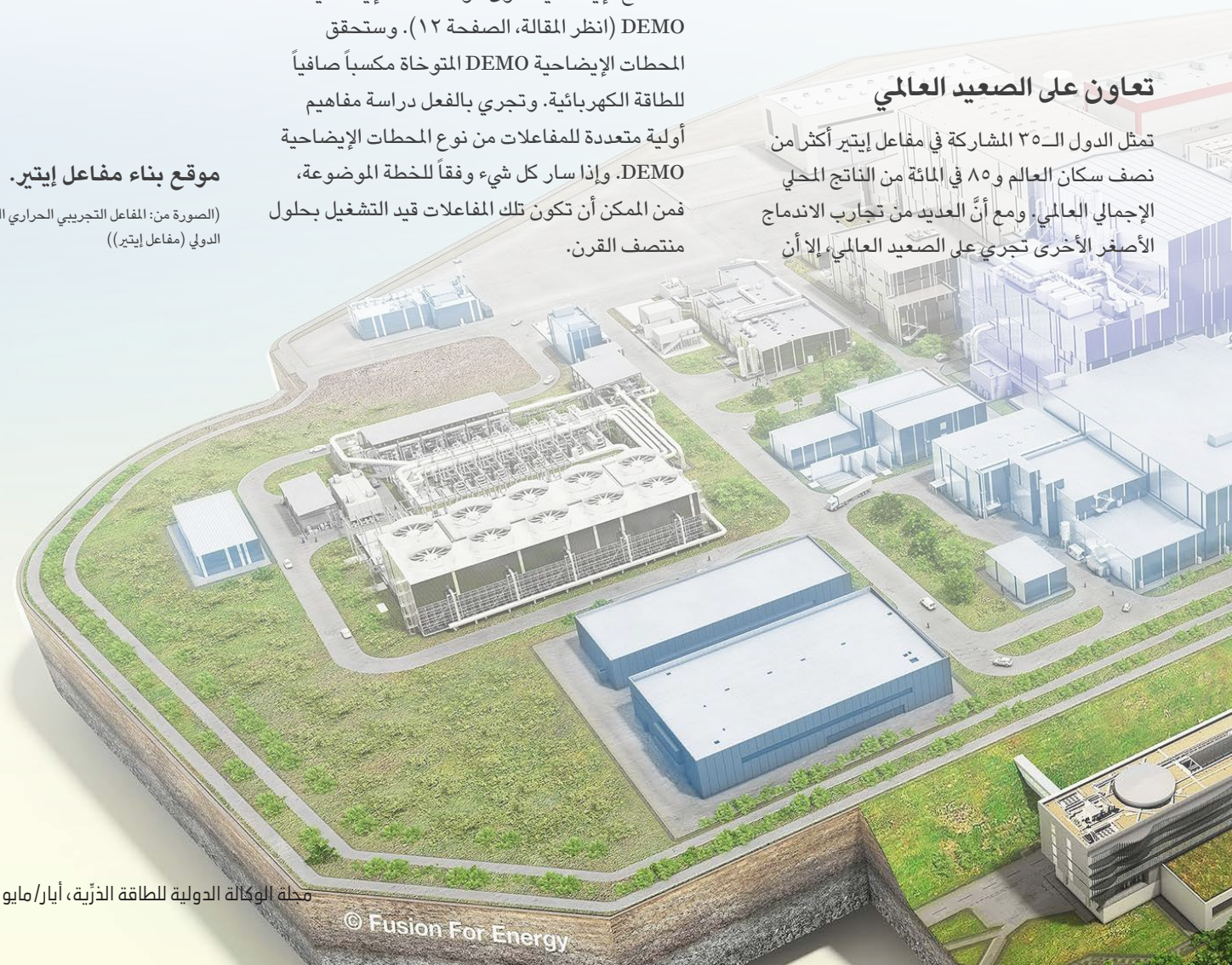
وستكون قمة أداء مفاعل إيتير مثيرة للإعجاب، ولكن لن يتحقق ذلك إلا لفترة قصيرة جدًّا من الوقت. ولكي تصبح محطات قوى الاندماج المستقبلية مصدراً ثابتاً للكهرباء، سوف تحتاج إلى العمل بشكل مستمر. وأي قيمة Q تبلغ خمسة أضعاف ستمثِّل عتبة حرجة، فتبدأ البلازما عند تجاوز تلك القيمة في تسخين نفسها لاستدامة تفاعل الاندماج من تلقاء نفسها. ومن أجل التوصل إلى فهمٍ أفضل لكيفية تحقيق هذا التفاعل الذاتي الاستدامة، يهدف مفاعل إيتير في نهاية المطاف إلى تحقيق قيم Q من خمسة أضعاف والحفاظ عليها لفترات أطول بكثير من عشر دقائق.

تعاون على الصعيد العالمي

تمثل الدول الـ٣٥ المشاركة في مفاعل إيتير أكثر من نصف سكان العالم و٨٥ في المائة من الناتج المحلي الإجمالي العالمي. ومع أنَّ العديد من تجارب الاندماج الأصغر الأخرى تجري على الصعيد العالمي، إلا أن معظمها ينسق كذلك مع المنظمة المعنية بمفاعل إيتير أو يتعاون أو يتآزر معها.

ولقد كانت للوكالة والمنظمة المعنية بمفاعل إيتير علاقة وثيقة منذ البداية، ولا سيما في مجالات بحوث الاندماج النووي، وإدارة المعارف، وتنمية الموارد البشرية، والأنشطة التعليمية والتوعية. وتساعد الوكالة أيضاً المنظمة المعنية بمفاعل إيتير على تبادل خبراتهما في مجال الأمان النووي والوقاية من الإشعاعات مع الدول الأعضاء في الوكالة، بما في ذلك الدول غير المشاركة في المشروع. وفي هذا العام، ستشارك المنظمة المعنية بمفاعل إيتير، إلى جانب المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة، في استضافة مؤتمر الوكالة الثامن والعشرين لطاقة الاندماج.

والأمل معقود على أن يثبت مفاعل إيتير الجدوى العلمية والتكنولوجية لإنتاج قوى الاندماج، وسيبدأ بحسب خطة بحوثه ذات النهج التدريجي، في إجراء أولى تجاربه في عام ٢٠٢٥. ومن المفترض أن تبدأ التجارب بكامل القوى في عام ٢٠٣٥. وإذا نجحت هذه التطورات، فإنها ستكون مَعلماً هامًّا وستمثل جسراً تاريخيًّا بين البحوث التجريبية ومحطات قوى الاندماج الإيضاحية الأولى، أو المحطات الإيضاحية DEMO (انظر المقالة، الصفحة ١٢). وستحقق المحطات الإيضاحية DEMO المتوخاة مكسباً صافياً للطاقة الكهربائية. وتجري بالفعل دراسة مفاهيم أولية متعددة للمفاعلات من نوع المحطات الإيضاحية DEMO. وإذا سار كل شيء وفقاً للخطة الموضوعة، فمن الممكن أن تكون تلك المفاعلات قيد التشغيل بحلول منتصف القرن.



موقع بناء مفاعل إيتير.

(الصورة من: المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير))

محطات قوى الاندماج الإيضاحية

خطوة إلى الأمام نحو إنتاج الكهرباء على نطاق واسع وتجاري

بقلم إيرينا شاتزيس وماتيو باربارينو

الهدف من المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير)، الذي يعتبر أكبر تجربة اندماج في العالم، هو إثبات كيفية إنتاج صافي الطاقة من تفاعل الاندماج. ومن ثم فإنَّ إيضاح أنه يمكن إنتاج صافي الكهرباء من طاقة الاندماج سيكون الخطوة الهامة القادمة. وهنا سيأتي دور محطات قوى الاندماج الإيضاحية أو المحطات الإيضاحية DEMO.

والمفاعلات من نوع المحطات الإيضاحية DEMO هي عبارة عن مفهوم تصميمي أكثر من كونها نسقاً معيَّناً لآلة اندماج. ولم تُستَكمل بعدُ التصاميم الأولية لهذه المفاعلات الإيضاحية DEMO المُموَّلة من القطاع العام، والتي هي قيد التطوير في عدة بلدان. وسيتم ذلك بعد الحصول على نتائج تجارب مفاعل إيتير.

ومن المقرر تشغيل المحطات الإيضاحية DEMO بشكل مستمر تقريباً لإنتاج أكثر من ٥٠ ميغاواطًّا من مكاسب صافي الكهرباء. والتحدي الرئيسي الذي ينبغي أن تواجهه هذه المحطات هو كيفية الحفاظ على استقرار بلازما الاندماج لفترة كافية لإنتاج الطاقة بصورة مستمرة.

ومع أنه لم يتم بعدُ حسم الكثير من المسائل المتعلقة بالمحطات الإيضاحية DEMO، إلا أنه يُرجَّح أن تكون هناك محطة إيضاحية عمومية DEMO من نوع مفاعل توكاماك ومن شأنها أن تستخدم نظائر الهيدروجين الثقيلة — أي الديوتريوم والتريتيوم — كوقود. ومع ذلك، فإن الإمدادات العالمية المتاحة من التريتيوم محدودة، وستحتاج المحطات الإيضاحية DEMO نفسها إلى إنتاج إمدادات كافية من التريتيوم من خلال ما يسمى «الأغطية» التي تولِّد وتستخرج التريتيوم. وقالت سيهيلا غونزاليس دي فيسنتي، الأخصائية في فيزياء الاندماج النووي في الوكالة، إن التحديات المتمثلة في تأجيج التريتيوم واستهلاكه واحتوائه واستخراجه وفصله هي تحديات ستحتاج أيضاً إلى تسويتها.

وثمة فرق رئيسي آخر بين المفاعلات الإيضاحية من نوع DEMO والمفاعلات التجريبية الموجودة، وهو إضافة النظم والتكنولوجيات المناسبة لأسر طاقة الاندماج وتحويلها إلى كهرباء.

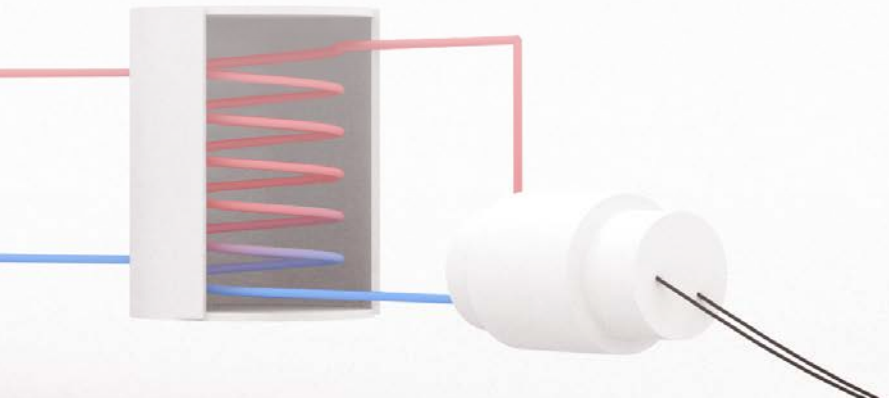
«إن الآلات من نوع المحطات الإيضاحية DEMO تتطلب تصميم وإدراج مكونات ونظم معقدة لا تكون جزءاً من آلات الاندماج التجريبية الموجودة. فالمكونات مثل أغطية استيلاد التريتيوم، وتوليد القوى، ومراقبة الحرق، وما إلى ذلك، كلها مكونات مطلوبة،» هذا ما قالته إيليزابيث ساري، رئيسة قسم التكنولوجيا في هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة. وأضافت قائلة: «إن ظروف تشغيل أي محطة إيضاحية هي ظروف غير ملائمة بشكل خاص للمواد، لأن البلازما المحترقة تولد تدفقاً عالياً من النيوترونات وكثافات عالية الطاقة على الجدران. وتتطلب هذه المحطات الإيضاحية تطوير مواد وتكنولوجيات جديدة.»

> **"تتطلب هذه المحطات الإيضاحية DEMO تطوير مواد وتكنولوجيات جديدة."**
>
> — إليزابيث ساري،
> رئيسة قسم التكنولوجيا،
> هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة

دور الوكالة الدولية للطاقة الذرية

تقوم مجموعات من الباحثين في مختلف البلدان باستكشاف مفاهيم ونهج المحطات الإيضاحية. وتسهِّل الوكالة التنسيق الدولي وتقاسم أفضل الممارسات من خلال سلسلة من الاجتماعات التقنية، ومنذ عام ٢٠١٢، من خلال حلقات العمل العادية لبرنامج المحطات الإيضاحية. وتعزز هذه المنصات النقاش بشأن مسائل الفيزياء والتكنولوجيا، وتسهِّل تقاسم استراتيجيات لبرامج المحطات الإيضاحية، وتحلِّل مسارات العمل المحتملة. ومع مرور الوقت، تحوَّل التركيز الموضعي من الرؤى الواسعة إلى التحديات التقنية المفصَّلة التي يجب التغلب عليها.

«وبالتركيز على تحديد المشاكل ومناقشة أنشطة البحث والتطوير الجارية، تمكِّن سلسلة الاجتماعات التقنية التي تنظمها الوكالة وحلقات العمل بشأن برنامج المحطات الإيضاحية المجتمع المحلي من تحديد المتطلبات وتحليل الحلول الممكنة بطريقة تعاونية. ومن الأمثلة على ذلك ظهور التحكم في البلازما كقضية رئيسية بالنسبة للأجهزة من نوع المحطات الإيضاحية DEMO عندما تكون هناك حاجة إلى تشغيل البلازما لفترة طويلة أو شبه مستمرة،»



كما قالت ساري، التي شغلت منصب رئيسة حلقات العمل الثلاث الأخيرة لبرنامج المحطات الإيضاحية في الفترة بين عامي ٢٠١٦ و٢٠١٩.

الخطط الموضوعة حول العالم

بينما لا تزال هناك مسارات مختلفة يجري استكشافها للوصول إلى الكهرباء القائمة على الاندماج، فإنَّ المسائل العلمية والتكنولوجية التي يتعين حلها هي مسائل تحظى باتفاق على نطاق واسع. ولكل بلد جداول زمنية مختلفة، ولكن الإجماع العام بين العلماء هو أنه يمكن تشييد وتشغيل مفاعل من نوع المفاعلات الإيضاحية لإنتاج الكهرباء بحلول عام ٢٠٥٠.

وفي الصين، أُحرز تقدم كبير في التخطيط لمفاعل اختبار هندسة الاندماج الصيني. وسيساعد هذا الجهاز في سد الفجوة بين المفاعل إيتير والمفاعلات الإيضاحية DEMO. وسيبدأ تشييد مفاعل اختبار هندسة الاندماج الصيني في عشرينات هذا القرن وسيتبعه تشييد مفاعل إيضاحي DEMO في ثلاثينات هذا القرن.

وفي أوروبا، يتولى اتحاد مختبرات الاندماج الأوروبية مسؤولية تطوير تصميم مفاعل إيضاحي DEMO. وقد دخل المشروع حاليًّا في مرحلة تصميم مفاهيمه (٢٠٢١-٢٠٢٧) وهو يهدف إلى إيضاح الجدوى التكنولوجية والاقتصادية للاندماج من خلال إنتاج عدة مئات من الميغاواط من صافي الكهرباء.

وقد أعلنت الهند عن خطط للبدء في بناء جهاز يسمى SST-2 لتأهيل مفاهيم ومكونات المفاعل لأغراض مفاعل إيضاحي DEMO في عام ٢٠٢٧ تقريباً وستبدأ بعد ذلك في بناء مفاعل إيضاحي في عام ٢٠٣٧.

ويعمل حاليًّا فريق التصميم الخاص المشترك الياباني المعني بالمحطة الإيضاحية DEMO على إجراء دراسة مفاهيمية لحالة ثابتة للمحطة الإيضاحية (JA DEMO)، ومن المقرر الشروع في أعمال البناء في حوالي عام ٢٠٣٥.

وفي عام ٢٠١٢، بدأت جمهورية كوريا دراسة تصميم مفاهيمي لمحطة إيضاحية 'K-DEMO' والهدف هو بناء المحطة بحلول عام ٢٠٣٧، مع إمكانية توليد الكهرباء ابتداء من عام ٢٠٥٠. وسوف تُستخدم المحطة الإيضاحية K-DEMO في مرحلتها الأولى (٢٠٣٧-٢٠٥٠)، لتطوير واختبار المكونات، وستستخدم بعدئذ تلك المكونات. وفي مرحلتها الثانية، بعد عام ٢٠٥٠، يؤمل في أن توضِّح المحطة قدرتها على توليد صافي الكهرباء.

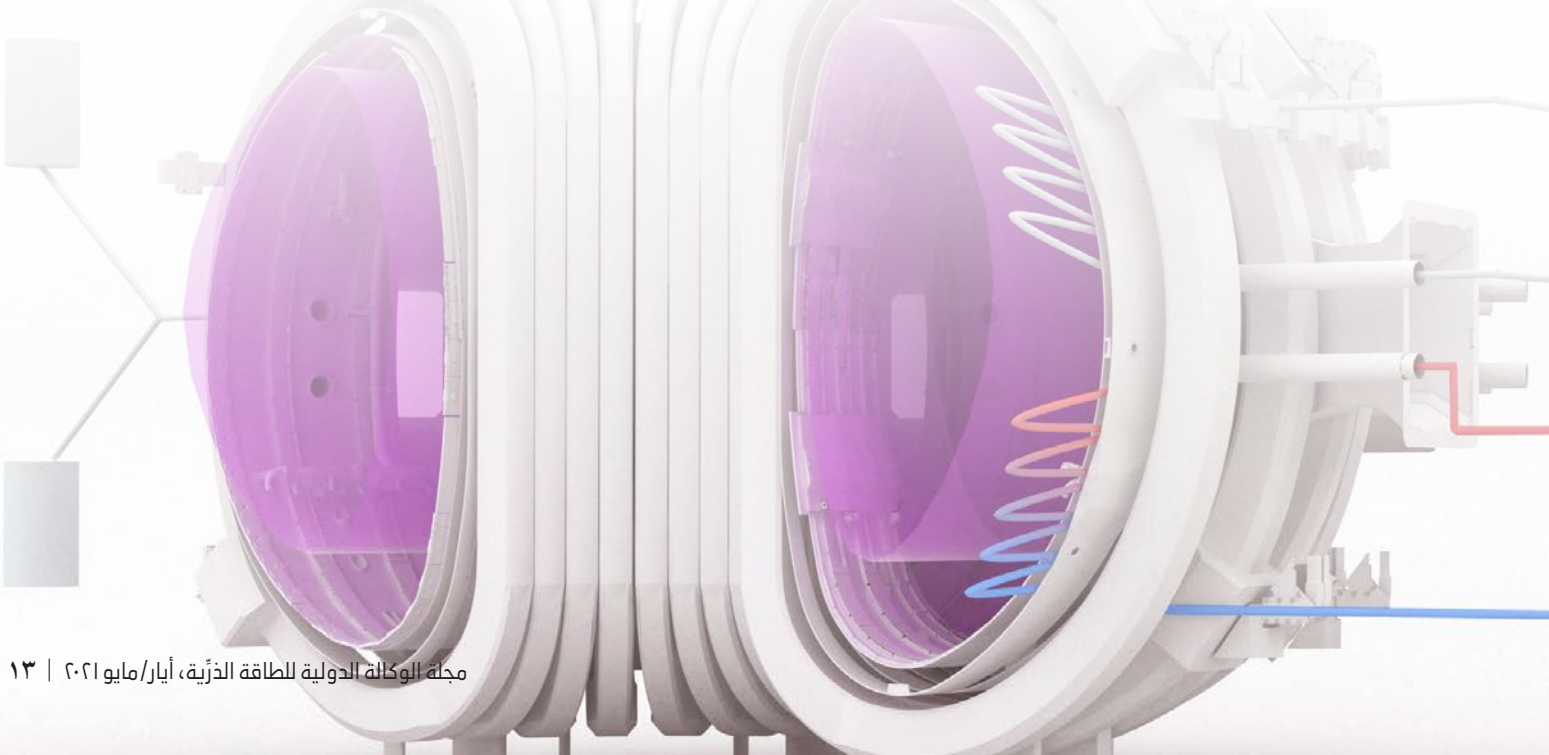
ويخطط الاتحاد الروسي لإنشاء مرفق هجين للاندماج والانشطار يسمى مصدر نيترونات الاندماج الإيضاحي، وسيعمل على الحصول على النيوترونات المنتجة بالاندماج لتحويل اليورانيوم إلى وقود نووي والقضاء على النفايات المشعة. ومن المقرر بناء مصدر نيترونات الاندماج الإيضاحي بحلول عام ٢٠٢٣، وهو جزء من استراتيجية المسار السريع التي يتبعها البلد لإنشاء محطة قوى الاندماج بحلول عام ٢٠٥٠.

وقد أصدر خبراء الاندماج في الولايات المتحدة الأمريكية مؤخرا تقريرين يوصيان ببدء برنامج وطني للبحوث والتكنولوجيا، بما في ذلك إقامة شراكات بين القطاعين العام والخاص، للوصول في نهاية المطاف بالاندماج إلى الجدوى التجارية. ويهدف البرنامج إلى القيام بذلك في الفترة ٢٠٣٥-٢٠٤٠، بهدف جعل البلد كرائد في مجال الاندماج وتسريع انتقاله إلى الطاقة المنخفضة الكربون بحلول عام ٢٠٥٠.

وتزامناً مع ذلك، فإن العديد من المؤسسات التجارية الممولة من القطاع الخاص تخطو أيضا خطوات كبيرة نحو تطوير مفاهيم لمحطات قوى الاندماج، بالاعتماد على الدراية التي تم اكتسابها على مدى سنوات من أنشطة البحث والتطوير الممولة من القطاع العام واقتراح جداول زمنية تتسم بالطموح الزائد.

تصوُّر فنان لمحطة قوى اندماج تحوِّل حرارة الاندماج إلى حرارة وكهرباء.

(المصدر: اتحاد مختبرات الاندماج الأوروبية)



الأمان في الاندماج

عملية آمنة بطبيعتها

بقلم كارلي ويليس وجوان ليو

في الوقت الذي يستمد الانشطار النووي الطاقة من تقسيم النوى الذرية، فإنَّ الاندماج النووي يفعل ذلك من خلال ضمِّ بعضها مع بعض، فتنطلق الطاقة خلال هذه العملية. ورغم أن كلا التفاعلين الذريين ينتج الطاقة عن طريق تعديل الذرات، فإن اختلافاتهما الجوهرية لها تأثيرات واسعة النطاق فيما يتعلق بالأمان.

والظروف المطلوبة لكي يبدأ تفاعل الاندماج ويتم الحفاظ عليه تجعل من المستحيل وقوع حادث من نوع حوادث الانشطار أو انصهار المفاعل النووي استناداً إلى سلسلة من التفاعلات. وسوف تحتاج محطات قوى الاندماج النووي إلى ظروف خارجة عن هذا العالم — إذ تحتاج إلى درجات حرارة تتجاوز ١٠٠ مليون درجة مئوية لتحقيق كثافة عالية بما فيه الكفاية في الجسيمات لكي يحدث التفاعل. وأوضحت سهيلا غونزاليس دي فيسنتي، الأخصائية في فيزياء الاندماج النووي في الوكالة، بأنَّ تفاعلات الاندماج لا يمكن أن تحدث إلا في ظل هذه الظروف القاسية، فحدوث سلسلة تفاعلات «جامحة» أمر مستحيل.

وتعتمد تفاعلات الاندماج على المدخلات المستمرة للوقود، وتعتبر هذه العملية حساسة للغاية لأي اختلاف قد يقع في ظروف العمل. وبالنظر إلى أن تفاعل الاندماج يمكن أن يتوقف في غضون ثوان، فإنَّ العملية آمنة بطبيعتها. وأضافت قائلة: «إنَّ الاندماج هو عملية ذاتية التحكم: فإذا تعذَّر التحكم في التفاعل، فإن العملية تتوقف من تلقاء ذاتها.»

وعلاوة على ذلك، فإن الاندماج لا ينتج نفايات نووية قوية الإشعاع وطويلة العمر. وقالت غونزاليس دي فيسنتي: «لا ينتج الاندماج سوى نفايات منخفضة الإشعاع ولا يشكِّل أي خطر جسيم.» فالمفردات الملوثة، مثل الملابس الواقية ولوازم التنظيف وحتى الأنابيب الطبية أو المسحات، هي نفايات مشعة قصيرة الأجل ومنخفضة الإشعاع ويمكن التعامل معها بأمان مع اتخاذ الاحتياطات الأساسية.

ومعظم أجهزة الاندماج التجريبية الحالية تستخدم مزيجاً من الديوتريوم والتريتيوم كوقود. والتريتيوم هو نظير مشع للهيدروجين له نصف عمر يبلغ ١٢,٣ عاماً. وقالت غونزاليس دي فيسنتي إنه نتيجة لتفاعل الاندماج، تنطلق النيوترونات فتؤثر على الجدار المحيط بقلب المفاعل الذي يمتصها، مما يجعلها مشعة. «وتتفاعل النيوترونات مع الليثيوم الموجود في الجدار، فتولِّد التريتيوم الذي يمكن إعادة حقنه بعد ذلك في الجهاز.»

ومع ذلك، هناك بعض أوجه التشابه التي تجمع بين مرافق الاندماج ومرافق الانشطار، مثل كيفية التعامل مع المواد المشعة وكيفية استخدام نظم التبريد. وقالت غونزاليس دي فيسنتي «إنَّ الهيئات الرقابية تتمتع بخبرة واسعة في مجال الأمان والأمن فيما يتعلق بالانشطار. ونحن نعمل مع هذه الهيئات لضمان نقل جميع المعارف القابلة للتطبيق إلى مجال الاندماج». وأضافت قائلة «ومع ذلك، لا يمكن ترجمة كل شيء بشكل تناظري، وينبغي تحديد ومعالجة الاختلافات مع الاندماج، كانخفاض كمية المواد المشعة وتنوعها، واستحالة وجود ظروف انصهار قلب المفاعل، وعدم وجود نفايات طويلة الأجل. وتساعد الوكالة على تسهيل هذه الجهود.»

التعاون الدولي

جمعت منظمة مفاعل إيتير، وهي أكبر تجربة اندماج في العالم، خبراء من ٣٥ بلداً للعمل من أجل جعل مصادر طاقة الاندماج واقعاً فعليًّا، وفي الوقت ذاته دأبت على تقديم المساعدة للتغلب على التحديات التي يواجهها الاندماج في مجالي الأمان والأمن مع تطور المشروع.

ويمكن ضمان درجة عالية من الأمان بأن تُطبَّق على الاندماج متطلبات الأمان ذات الصلة الخاصة بالانشطار، مثل معايير الأمان التي تضعها الوكالة. فعلى سبيل المثال، وكما هو الحال فيما يتعلق بمفاعلات الانشطار النووي، يجب أن تنظر محطات الاندماج المقترحة أيضاً في اللوائح الخاصة بالجرعات، وينبغي تصميم المنشآت بحيث تكون الجرعة الدنيا 'عند أدنى حد معقول'، أو ما يُطلق عليه آلارا. ومع ذلك، ونظراً للاختلافات الأساسية في خطر وقوع حوادث، فإنَّ تطبيق نهج متدرِّج مسألة ضرورية لتجنب الإفراط في تنظيم عملية الاندماج. وقال ستيفان كالبينا، نائب رئيس إدارة الأمان والجودة في منظمة إيتير: «إنَّ المشكلة في جميع معايير الأمان الحالية هي أنها مصممة للانشطار. ونحن بحاجة إلى استخراج المعايير ذات الصلة بالاندماج وتطبيقها بطريقة تتناسب مع المخاطر للتأكد من أن التكنولوجيا ليست ممكنة

فحسب، بل إنها آمنة حقًّا. والاندماج هو وسيلة جديدة لصنع الطاقة، وهو تكنولوجيا لا تزال إلى حد كبير تكنولوجيا شابة.»

وتساعد الوكالة على تعزيز هذه التكنولوجيا بعقد اجتماعات تقنية للخبراء لتبادل المعرفة التي يمكن أن تساعد في التغلب على التحديات في الاندماج وضمان أمان مرافق الاندماج. ولقد ركَّز الاجتماع التقني الأول المشترك بين الوكالة ومنظمة إيتير بشأن الأمان والوقاية من الإشعاعات في مجال الاندماج، والذي ترأَّسه كالبينا في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠٢٠، على وضع منهجية لتحديد الأنواع والكميات المحتملة من المواد المشعة أو الخطرة التي يمكن إطلاقها في البيئة في مرافق الاندماج، وكذلك على إعداد منشورات خاصة بالاندماج تكون مماثلة للعددين SSR-4 وSSG-12 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة. وتناول الاجتماع مواضيع مثل معايير المخاطر المتعلقة بمرافق الاندماج وتصميم وتشغيل هذه المرافق. وستنظر حلقة العمل بشأن التصرف في النفايات الناتجة عن الاندماج، والمقرر عقدها في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠٢١، في كيفية تصنيف النفايات المشعة الناتجة عن إنتاج طاقة الاندماج والتخلص من تلك النفايات.

يجري تركيب أحد قطع الأوعية الفراغية لمفاعل إيتير، وهو قطعة تزن ٤٤٠ طنًّا ومن شأنها أن تساعد على احتواء البلازما التي ينتجها الجهاز.

(الصورة من: منظمة إيتير)

كيف تساعد قواعد بيانات الوكالة على المضي قُدماً بالبحوث من أجل التوصل إلى استخدام الاندماج استخداماً تجاريًّا

بقلم ألكساندرا بيفا

إنَّ الوعد بتسخير إمكانات الطاقة الوفيرة في مجال الاندماج النووي من خلال الاندماج التجاري يتطلب فهماً أفضل للبلازما — أي الغازات المؤينة الشديدة السخونة — وتطوير مواد للمفاعلات العالية الأداء. وبدعم العلماء الذين يدرسون سلوك البلازما، ونمذجة خصائص المواد المستخدمة في بحوث الطاقة الاندماجية، تساعد قواعد بيانات الوكالة على الدفع بعجلة البحوث نحو إنتاج الطاقة في نهاية المطاف على نطاق تجاري.

ومن الأهمية بمكان بالنسبة لتطوير طاقة الاندماج الوصول إلى الظروف القصوى اللازمة لبلوغ 'إشعال الاندماج' — وهي النقطة التي تتم عندها استدامة تفاعل الاندماج عبر الطاقة المولَّدة من ذلك التفاعل، ومن ثم الحفاظ على تلك الظروف. ويتطلب ذلك أن تقتصر أنواع وقود البلازما الناتجة عن التفاعل والواجب احتواؤها في مساحة لفترة كافية للسماح للاندماج بأن يتطوَّر ويسخِّن نفسه لدرجة التوصل إلى الاكتفاء الذاتي.

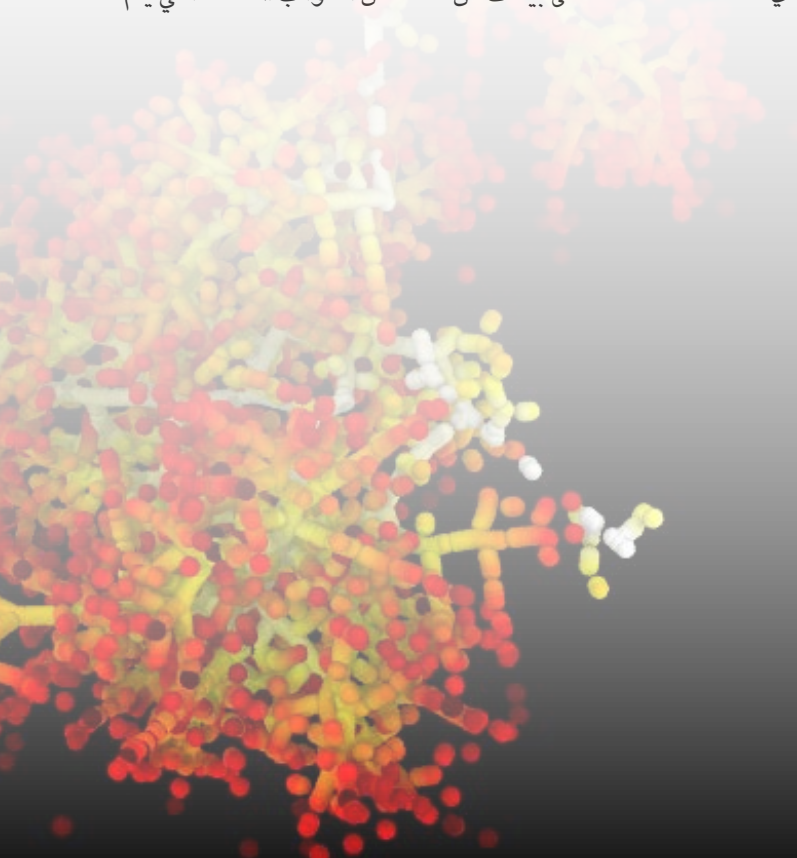
كما يتطلب الإشعال من المهندسين تطوير مواد جدار المفاعل العالية الأداء والقادرة على تحمل التدفق المطرد للطاقة في شكل حرارة ونيوترونات طليقة. وهذه الطاقة تسخِّن الجدران، ويمكن أن يؤدي القصف النيوتروني إلى تلف المادة — مما يقوِّض سلامة مادة الجدار أو يتسبب في فرقعة المادة مرة أخرى في البلازما وتبريدها.

وينبغي أن تمتص مواد المفاعل أيضاً أقل قدر ممكن من التريتيوم — وهو أحد نظائر الهيدروجين لوقود الاندماج. ووقود التريتيوم الممتص هو وقود ضائع بالنسبة للتفاعل. ولكن الأهم من ذلك أن التريتيوم مادة مشعة، وللتقليل إلى أدنى حد من كمية النفايات النووية الناتجة في نهاية المطاف ومن درجة سميتها الإشعاعية، من الأنسب ألا تمتص جدران المفاعل التريتيوم وتصبح مشعة في هذه العملية.

> **"لا يمكن التنبؤ بالخصائص ذات الصلة للمواد المرشحة إلا بوجود بيانات موثوقة مستمدة من حسابات وتجارب دقيقة."**
>
> — كريستيان هيل، رئيس وحدة البيانات الذرية والجزيئية التابعة للوكالة الدولية للطاقة الذرية

استكشاف سلوك البلازما

من الضروري الحصول على فهم عميق لسلوك البلازما في المفاعل لزيادة طول الوقت الذي يمكن احتواء البلازما فيه بواسطة القوى المغناطيسية. وتحتفظ قواعد بيانات الوكالة بمعلومات عن العمليات التي تحدث في بلازما قلب المفاعل وبلازما محيط المفاعل، وكذلك في نظم حقن الحزم المحايدة المستخدمة لتسخين البلازما من أجل التوصل إلى الإشعال. كما أنها تحتوي على بيانات عن خصائص الشوائب المختلفة التي يتم



حقنها عمداً في البلازما لأغراض التشخيص وللتخفيف من حالات عدم الاستقرار.

وقاعدة نظام تبادل البيانات الذرية التابعة للوكالة هي مستودع يسهل البحث فيه ويضمُّ بيانات تصادم مقيَّمة فيما يخص العمليات ذات الصلة بالاندماج. ويستخدمه مجتمع البحوث لإجراء عمليات تشخيص البلازما والتعرُّف على بارامترات البلازما الهامة، مثل درجة الحرارة والكثافة. وباستخدام نظام تبادل البيانات الذرية، يستطيع العلماء الحصول على فهم أفضل للخصائص التصادمية-الإشعاعية للأيونات التي تعتبر حاسمة للتوصل إلى تشخيص موثوق للبلازما.

مواد النمذجة لتحقيق الاندماج

إن نقص المرافق التي تكرِّر الظروف القصوى لمفاعل اندماج يجعل إنشاء مواد جديدة لمحطات قوى الاندماج المستقبلية أمراً معقداً. وباستخدام تقنيات النمذجة الحاسوبية، ومنصات الحوسبة العالية الأداء، وأدوات التصنيف التجريبي التحليلي، يستطيع الخبراء تصميم مواد يمكن أن تؤدي أداء جيداً في بيئة طاقة الاندماج.

ومن خلال النمذجة، يجري اكتشاف مواد جديدة والتنبؤ بموثوقية المواد الموجودة. وهذا أمر مهم بشكل خاص لجدار المفاعل الأعمق، الذي يقع في أقرب مكان للبلازما في وعاء المفاعل وهو يحمي مكونات وعاء المفاعل من التلف الذي تسبِّبه البلازما.

وقال كريستيان هيل رئيس وحدة البيانات الذرية والجزيئية التابعة للوكالة «إنَّ البيئة القصوى للجدار الأول لمفاعل الاندماج النووي تتطلب اختياراً دقيقاً للمواد التي يجب أن تصمد أمام درجات الحرارة المرتفعة وقصف الجسيمات دون أن تصبح متآكلة أو هشة أو مشعة ودون الاحتفاظ بوقود الهيدروجين. فلا يمكن التنبؤ بالخصائص ذات الصلة للمواد المرشحة إلا بوجود بيانات موثوقة مستمدة من حسابات وتجارب دقيقة.»

ويستخدم الباحثون قواعد بيانات الوكالة في بحوث طاقة الاندماج وغيرها من تطبيقات علوم وتكنولوجيا البلازما. وتقوم الوكالة بجمع البيانات وتقييمها من خلال شبكاتها ومشاريعها البحثية المنسقة واجتماعاتها التقنية، ثم توزعها من خلال قواعد بياناتها الإلكترونية المجانية والمنسَّقة والتي يسهل البحث فيها.

وقال هيل: «إنَّ قيمة قاعدة بيانات دولية منسقة هي في الدور التي تؤديه كمستودع دائم وموثوق به ويمكن الوصول إليه للبيانات المقيَّمة التي يمكن أن يستخدمها مجتمع الاندماج مجاناً. ووحدة البيانات الذرية والجزيئية التابعة للوكالة هي أيضاً وحدة فريدة من نوعها من نواح أخرى: فهي موجودة منذ أكثر من ٤٠ عاماً، وهي قديمة جدًّا في «سنوات بيانات الاندماج».

ويجري باستمرار تحسين وتوسيع قواعد بيانات الوكالة استناداً إلى الاحتياجات المحددة من البيانات للباحثين، بما في ذلك تحديد كمية وتأثيرات أوجه عدم اليقين في البيانات، وتقنيات التحقق من صحة البيانات، وتنسيقها ونشرها.

ويمكن الوصول إلى جميع قواعد البيانات المتصلة بالاندماج التي تحتفظ بها الوكالة على الموقع التالي: *amdis.iaea.org/databases*

تصور لتسلسل الاصطدامات التي تؤدي إلى تلف في مادة بلورية.

(الصورة مهداة من أندريا ساند/ جامعة آلتو)

البلازما المتأجِّجة

خطوة حاسمة الأهمية على طريق توليد قوى الاندماج

بقلم ماتيو باربارينو

تؤدِّي قوى الجاذبية الشديدة في قلب الشمس إلى ارتفاع الحرارة والضغط إلى مستويات هائلة، ومن ثمَّ إيجاد ظروف مثالية للاندماج النووي.

ودون قوى الجاذبية الضخمة التي تتولَّد عن نجم بحجم الشمس، يطرح استنساخ هذه الظروف على الأرض باستخدام مفاعل اندماجي العديد من التحديات التقنية. ويتمثَّل أكبر هذه التحديات في المحافظة على درجة حرارة بلازما الاندماج — وهي المادة التي يقع التفاعل الاندماجي فيها، وهي عبارة عن مادة غازية مشحونة مكوَّنة من أيونات وإلكترونات حرة — فوق ١٠٠ مليون درجة مئوية، بما يؤدي إلى احتجاز جسيمات البلازما داخل مجال مغناطيسي وإبقائها معاً لفترة تكفي لإتمام التفاعلات الاندماجية وإنتاج الطاقة.

ويُعدُّ فهم الفرضيات الحالية بشأن سلوك بلازما الاندماج الساخنة والتحقُّق من صحة تلك الفرضيات من أهم المسائل التي يجب على العلماء والمهندسين العاملين في مجال الاندماج النووي أن يعالجوها حتى يمكن في نهاية المطاف إنتاج الطاقة من الاندماج.

وقود فائق للوصول إلى درجات حرارة تفوق درجة حرارة الشمس

هناك اختيارات محدودة فيما يتعلق بأنواع الوقود التي يمكن استخدامها في الاندماج النووي. والنوع الذي ينطوي على إمكانية تحقيق أعلى مستوى من الأداء على سطح الأرض يُصنع من خليط من الديوتيريوم والتريتيوم — وهما شكلان ثقيلان من الهيدروجين. وحين تتصادم ذرات الديوتيريوم والتريتيوم في درجات حرارة بالغة الارتفاع، يقع الاندماج بينها وتتولَّد جسيمات مشحونة مؤلَّفة من بروتونين ونيوترونين، تُعرف بجسيمات ألفا، كما تتولَّد نيوترونات حرة. وفي حين تُفلت النيوترونات من المجال المغناطيسي ولا تتفاعل مع البلازما، تظلُّ جسيمات ألفا حبيسة المجال المغناطيسي وتزيد من ارتفاع درجة حرارة البلازما المحيطة بها. ويقول السيد ماثيو هول، الأستاذ بالجامعة الوطنية الأسترالية: «إنَّ التحكُّم في هذه الزيادة في درجة الحرارة أمرٌ حاسم الأهمية للنجاح في تسخير قوى الاندماج.»

ويتوقف توليد القوى الاندماجية بطريقة مأمونة ومستدامة على جسيمات ألفا المشحونة وطاقتها لإبقاء البلازما عند درجة حرارة ثابتة، ومن ثمَّ إتاحة الفرصة لكي تستمر التفاعلات الاندماجية بوتيرة ذاتية الاستدامة، وهو أمرٌ يلزم تحقيقه حتى يمكن تشغيل مفاعل اندماجي.

وفي تسعينات القرن الماضي، أمكن إنتاج ما يصل إلى ١٦ ميغاواطًا من القوى باستخدام المفاعلات الاندماجية التجريبية لفترة أقلَّ قليلاً من الثانية. وفي هذه التجارب، لم توفِّر جسيمات ألفا سوى ما يقرب من عشرة في المائة من الحرارة المزوَّدة من مصادر خارجية. أمَّا فهم ما يجري عندما توفِّر جسيمات ألفا قدراً أكبر من الحرارة، فسوف يُستكشف عن طريق مبادرات مثل المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (مفاعل إيتير) — الذي يجري تشييده في فرنسا في إطار تجربة دولية على نطاق مفاعل كامل (انظر المقالة، الصفحة ١٠).

ويقول السيد ألبرتو لوارتي، رئيس شعبة العلوم بالمنظمة المعنية بمفاعل إيتير: «سوف يتيح لنا مفاعل إيتير الفرصة لدراسة حالات 'البلازما المتأجِّجة' التي لا تقلُّ فيها مساهمة جسيمات ألفا الناتجة من الاندماج عن ٦٦ في المائة من إجمالي الحرارة المستخدمة. وفي تلك الظروف، سوف يُنتج مفاعل إيتير ٥٠٠ ميغاواط من القوى الاندماجية لفترة تصل إلى ٥٠٠ ثانية.» ويضيف السيد لوارتي أنَّ التجارب التي تجريها منظمته سوف توفِّر إجابات مطلوبة بشدَّة لأسئلة رئيسية في مجال فيزياء البلازما المتأجِّجة، مثل السؤال المتعلق بكيفية إنتاج بلازما ذاتية الاستدامة باستخدام الحرارة الداخلية المتولِّدة من جسيمات ألفا المنبعثة منها، وكذلك كيفية تحديد الظروف التشغيلية المثلى لتحقيق مستوى مرتفع من الأداء في الاندماج مع مراعاة قدرة جدار المفاعل على التحمُّل.

"سوف يتيح لنا مفاعل إيتير الفرصة لدراسة حالات 'البلازما المتأجِّجة' التي لا تقلُّ فيها مساهمة جسيمات ألفا الناتجة من الاندماج عن ٦٦ في المائة من إجمالي الحرارة المستخدمة."

— ألبرتو لوارتي، رئيس شعبة العلوم بالمنظمة المعنية بمفاعل إيتير

كيفية إنتاج بلازما ذاتية الاستدامة

يُعدُّ «مكسب القوى الناتج من الاندماج» من المؤشرات المهمة التي تدلُّ على مستوى أداء المفاعل الاندماجي، وهو يتحدَّد بناءً على درجة حرارة البلازما وكثافتها وزمن احتواء الطاقة — وهو مقياس لمدى كفاءة المجال المغناطيسي في الاحتفاظ بطاقة البلازما مع مرور الوقت. ولإيجاد تفاعل ذاتي الاستدامة، يلزم تحقيق ثلاثة شروط: أن تبلغ درجة الحرارة نحو ١٠٠ مليون درجة مئوية؛ وأن تكون الكثافة أقلَّ مليون مرة من كثافة الهواء؛ وأن يكون زمن احتواء الطاقة بضع ثوان فحسب.

ورغم أنَّ هذه الشروط اللازمة مفهومة جيِّداً، فالكيفية التي يمكن بها تحقيقها جميعاً في نفس الوقت ليست جليَّة على الإطلاق. وعلى سبيل المثال، فزيادة كثافة البلازما أمرٌ مفيد من حيث المبدأ، حيث إنَّها تزيد من احتمالية وقوع التفاعلات الاندماجية. ومع ذلك تشير تجارب عديدة إلى أنَّه كلما اقتربت الكثافة من حدِّها الأقصى، يتدهور احتواء البلازما بمعدَّل أعلى من المتوقع، حسبما يقول السيد ريتشارد هوريلاك، المدير المساعد لشؤون الاندماج في مختبر برينستون لفيزياء البلازما بالولايات المتحدة الأمريكية.

وحتى تنجح تجربة مفاعل إيتير، يتعين إيجاد حلول لهذه المشاكل، وكثيرٌ من البحوث اللازمة لذلك يتطلب التعاون الدولي. وتعقد الوكالة سلاسل من الاجتماعات التقنية بشأن فيزياء الجسيمات النشطة، والتحكُّم في البلازما، والحصول على بيانات الاندماج والتثبُّت من صحتها وتحليلها، ومن ثمَّ توفِّر محفلاً لتبادل النتائج العلمية والتقنية، كما أنَّها تساعد على وضع أدوات النمذجة التي يمكن استخدامها للتنبُّؤ بسلوك بلازما الاندماج في مفاعل إيتير وفي مفاعلات القوى الاندماجية في المستقبل.

البحث عن 'المكان المثالي'

يتمثَّل أحد التحديات الكبرى في إيجاد الظروف التشغيلية المثلى التي تكفل أقصى قدر ممكن من القوى الاندماجية والتحكُّم في البلازما ومن ثمَّ تتيح تحقيق مستوى عالٍ من الأداء دون تجاوز الحدود التشغيلية لفترات طويلة. ويُعتبر تجاوز الحدود التشغيلية إشكاليًّا لأنَّه يمكن أن يؤدي إلى أشكالٍ من عدم الاستقرار قد يترتب عليها إنهاء حالة البلازما، في إطار الظاهرة التي تُعرف باسم اختلال البلازما.

ويقول السيد مايكل لينن، المنسق العلمي لقسم الاستقرار والتحكُّم بالمنظمة المعنية بمفاعل إيتير: «في مفاعل قائم على جهاز توكاماك حلقي الشكل، مثل مفاعل إيتير، يمكن للاختلالات أن تؤدي إلى إنهاء حالة البلازما في غضون بضعة أجزاء من ألف جزء من الثانية، مما يلقي بعبء حراري وميكانيكي كبير على مكوِّنات المفاعل. وتساعد الوكالة على تلافي وقوع هذا السيناريو عن طريق تعزيز تبادل المعلومات بشأن الأعمال الجارية في هذا المجال على المستوى التجريبي والنظري وعلى مستوى النمذجة، مع التركيز بوجه خاص في السنوات القليلة المقبلة على إرساء أساس راسخ لتصميم نظام التخفيف من أثر الاختلالات في مفاعل إيتير.»

وقد أسفرت التجارب التي أُجريت في الآونة الأخيرة وجهود النمذجة المتضمِّنة أساليب قائمة على الذكاء الاصطناعي عن تسليط مزيد من الضوء على متطلبات التحكُّم الفعَّال في البلازما — مما يساعد على تمهيد الطريق أمام تصميم محطات القوى الاندماجية وتشغيلها بطريقة آمنة في المستقبل. وتقول السيدة كريستينا ريا، وهي من علماء البحوث في مركز علوم البلازما والاندماج بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا: «إنَّ تطبيق الأساليب الإحصائية المتقدِّمة العالية الفعالية ونُهُج التعلُّم الآلي في مجال بحوث الاختلالات يمكن أن يساعد على تحديد الأنماط والكشف عن معلومات مستترة بما يعادل سنين طويلة من جمع البيانات التجريبية».

وثمَّ حالة ناشئة من التآزر المثمر فيما بين المتخصِّصين في مجالات فيزياء التحكُّم والنمذجة ووضع السيناريوهات وهندسة البيانات، حيث يجري تصميم حلول جديدة لتلافي تجاوز الحدود بما يؤدي لوقوع اختلالات. وتضيف السيدة ريا أنَّه لا بد من الاضطلاع بمزيد من العمل من أجل تقييم إمكانية تطبيق هذه المنهجيات المستندة إلى البيانات على مشاريع من قبيل مفاعل إيتير، بيد أنَّ النتائج مشجِّعة حتى الآن.

تصوُّر بصري للجسيمات العالية الطاقة، في شكل بلازما، أثناء تدفقها خلال مفاعل من النوع القائم على جهاز توكاماك.

(الصورة من: موقع Shutterstock)

سد الثغرات في المواد والتكنولوجيات المستخدمة في الاندماج

بقلم ماتيو باربارينو

يمكن القول إنَّ الاندماج النووي هو أكثر المساعي الجارية على وجه الأرض إثارة للتحديات في مجالَي العلوم والهندسة. فإذا ما أُنشئ مفاعلٌ اندماجي وأمكن تحقيق التفاعل الذاتي الاستدامة وتحويله إلى مصدر للكهرباء يكاد يكون غير قابل للاستنفاد، فإنَّ ذلك سوف يغيِّر حال البشرية كما سيغيِّر علاقتنا بالطاقة إلى الأبد. ورغم ما ينطوي عليه هذا المطمح من بريق، فإنَّ التقدُّم صوب تحقيقه لم يكن يسيراً ولا سلساً. ولا تزال الهياكل وأنواع الوقود والمواد اللازمة للمحافظة على سلامة هذه الآلات المعقدة المنشودة محاطة بتحديات تقنية لم تُحلّ إلا جزئيًّا.

ويبدأ فهم القيود التقنية والثغرات المعرفية التي تواجهها الطاقة الاندماجية اليوم بالنظر إلى داخل المفاعل نفسه.

ففي داخل مفاعل قائم على جهاز توكاماك (انظر المقالة، الصفحة ٦)، يجري تسخين «البلازما»، وهي عبارة عن غاز مؤيَّن عند درجة حرارة فائقة، لتصل درجة حرارتها إلى ١٠٠ مليون درجة مئوية لحثِّ التفاعلات الاندماجية. وبالاستعانة بمجال مغناطيسي قوي، يجري احتواء البلازما لحماية جدران المفاعل من البلازما المتطايرة.

وعادةً ما تكون البلازما المستخدمة في الاندماج النووي مكوَّنة من نظيرين ثقيلين للهيدروجين — الديوتريوم والتريتيوم — تندمج ذراتهما معاً في عملية تنتج منها ذرات هليوم ونيوترونات. ويأمل المهندسون أن يكون بوسعهم «استيلاد» التريتيوم أو إنتاج ذرات تريتيوم إضافية من التفاعل نفسه في محطات القوى الاندماجية، وذلك باستخدام طريقة لم تُختبر بعدُ تقوم على التدريع بدثار من الليثيوم يتفاعل مع النيوترونات الناتجة من الاندماج.

وكما يوضِّح السيد إيان تشابمان، الرئيس التنفيذي لهيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة: «تطرح الطاقة التي تحملها النيوترونات المتولدة من الاندماج تحدياتٍ خطيرة فيما يخصُّ البطانة الأولى والوعاء الفراغي في محطة القوى النووية، ومقتضى ذلك أنَّه يلزم إيلاء الاعتبار لمسائل الضرر الإشعاعي، والتدريع لأغراض الوقاية البيولوجية، والمناولة عن بُعد، والأمان.»

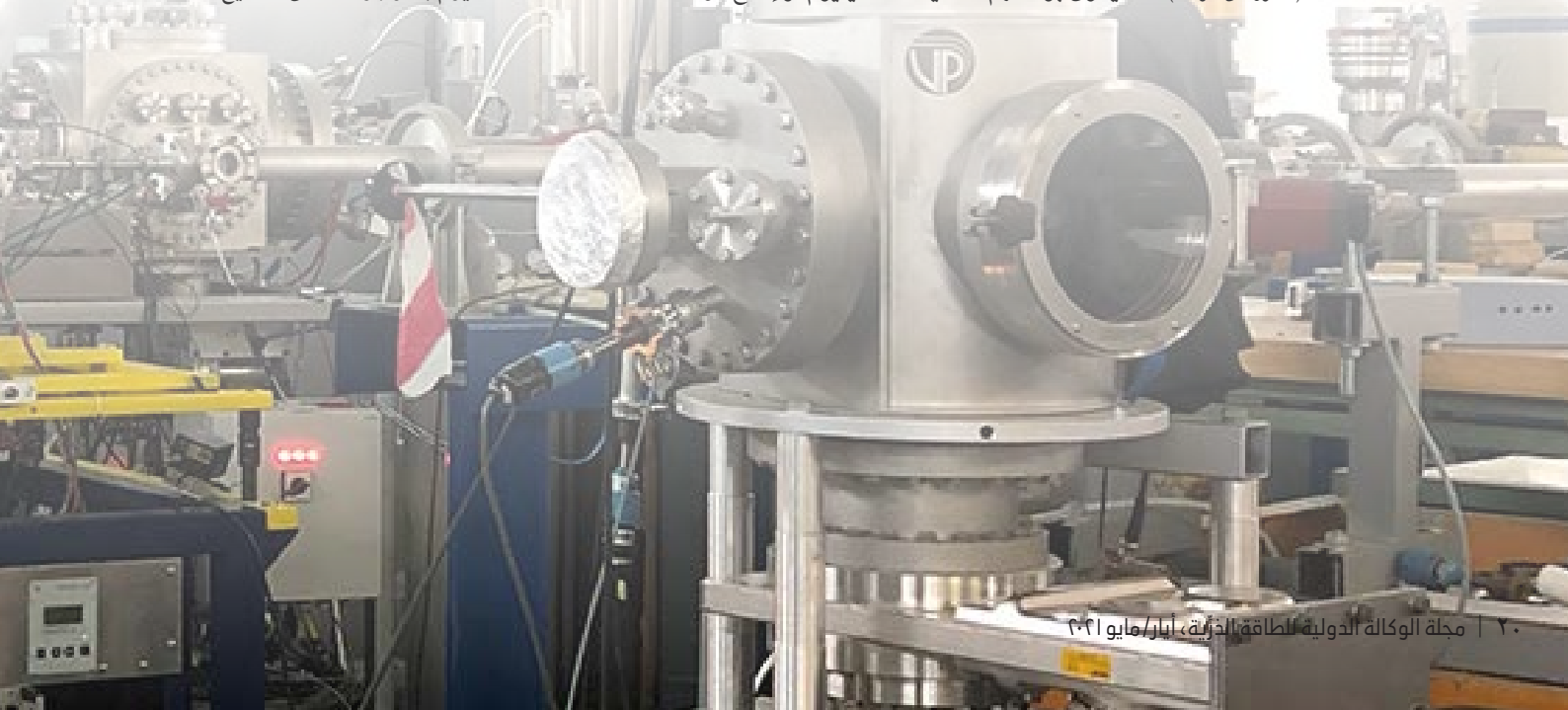
وأهم مهمة موكلة إلى المهندسين الآن هي تطوير مواد عالية الأداء قادرة على تحمُّل درجات الحرارة العالية والتدفُّقات النيوترونية الكثيفة التي تنتج من التفاعل. ويكتسي فهم تأثير الظروف التشغيلية في المكوِّنات المواجهة للبلازما أهميةً جوهريةً أيضاً لمستقبل محطات القوى الاندماجية الكبيرة الحجم.

تصميم المواد لتحمُّل الظروف المتطرفة

من الأولويات التي يعمل عليها الباحثون استحداث المواد لاستخدامها في المكوِّنات الهيكلية والمواجهة للبلازما بحيث تتحمَّل التدهور بفعل النيوترونات. وتتطلب هذه المواد سمات أمان مثل انخفاض مستوى النشاط الإشعاعي المستحث بالنيوترونات، من أجل التقليل إلى أدنى حدٍّ من إنتاج النفايات المشعة. بيد أنَّنا نفتقر اليوم إلى وجود مرافق تشعيع متخصِّصة

مرفق 'مصدر أيونات الهليوم وتشعيع مواد الاندماج بالحزم المزدوجة' (He Ion Source and DiFU Dual-Beam Facility) الذي رُكِّب في معهد رودر بوسكوفيتش في كرواتيا بدعم من الوكالة.

(الصورة من: الوكالة)



في مجال الاندماج، حيث يمكن اختبار آليات التدهور الإشعاعي وتطوير المواد وتأهيلها في الظروف اللازمة.

وتساعد الوكالة على معالجة المسائل المتصلة بتطوير مواد الاندماج وإجراء البحوث بشأنها، عن طريق تنسيق عملية صياغة المبادئ التوجيهية لتقنيات اختبار المواد المرجعية، وسد الثغرات المعرفية في تصميم المرافق اللازمة لاختبار المواد والمكوِّنات لاستخدامها في مفاعلات الاندماج.

وتقول السيدة ميليسا دينيكي، مديرة شعبة العلوم الفيزيائية والكيميائية بالوكالة: «يمكن استخدام تكنولوجيات مثل مرفق الحزم الأيونية المزدوجة الذي رُكِّب بدعم من الوكالة في معهد رودر بوسكوفيتش في كرواتيا لمحاكاة الظروف التي ستتعرَّض لها المواد في مفاعل اندماجي. وتشمل هذه الظروف التحوُّل النووي للنواتج ومحاكاة الأضرار التي تنجم عن النيوترونات والجسيمات النشطة المتولدة من الاندماج.»

والجزء الرئيسي الذي يشهد حدوث تلامس مباشر بين البلازما ووعاء المفاعل يُعرف باسم «المحرِّف»، ويعكف العلماء والمهندسون على دراسة النسق الأمثل له لتحسين قدرته على تحمُّل التدفُّقات الحرارية التي يتعرض لها. كما يعملون أيضاً على استخدام المعارف والبيانات المستمدة من العديد من تجارب التشعيع وأدوات المحاكاة لوضع إطار من معايير تصميم المفاعلات والتحقُّق منه فيما يتعلق بجميع المكونات الموجودة داخل الوعاء، بما فيها المحرِّفات.

تصريف العوادم البالغة السخونة

في معظم تصاميم مفاعلات الاندماج، تُوجَّه الشوائب من قبيل «رماد» الهليوم إلى أقصى قاع المفاعل، ويقوم المحرِّف بدور «أنبوب العادم» وهو الذي تُحوَّل إليه أيُّ حرارة زائدة لتصريفها. ويساعد هذا النسق على إنتاج أشكال «أكثر نقاءً» من البلازما وتحسين القدرة على احتواء الطاقة — وهي مؤشر حاسم الأهمية على أداء جهاز الاندماج — بما يضمن المحافظة على البلازما عند درجة حرارة كافية ولوقت كافٍ لكي تقع التفاعلات الاندماجية الذاتية الاستدامة.

وفي مفاعل إيتير، وهو أكبر تجربة اندماج في العالم، سيكون المحرِّف مكوَّناً من ٥٤ وحدة «كاسيت» تزن كلٌّ منها ١٠ أطنان. وستواجه هذه الوحدات ظروفاً تقتضي متطلبات بالغة الصرامة؛ بما في ذلك تدفُّقات حرارية ثابتة تتراوح بين ١٠ و٢٠ ميغاواطًا للمتر المربع، في حين ستتعرَّض بعض الأجزاء لدرجات حرارة بين ١٠٠٠ و٢٠٠٠ درجة مئوية، وسيلزم استبدال وحدات الكاسيت عن طريق المناولة عن بُعد على الأقل مرة واحدة خلال فترة عمر المفاعل. ولتهيئة المكونات المواجهة للبلازما لتحمُّل درجات الحرارة المتطرفة والجسيمات المسبِّبة للتلف، فسوف تُدرَّع هذه المكونات بالتنغستن، وهي مادة تتَّسم بانخفاض مستوى امتصاص التريتيوم فضلاً عن كون درجة انصهارها هي الأعلى بين جميع العناصر الطبيعية.

ويقول السيد ريتشارد بيتس، رئيس قسم التجارب وعمليات البلازما في المنظمة المعنية بمفاعل إيتير: «رغم أنَّ تصميم المحرِّف في مفاعل إيتير يُعدُّ تجسيداً لأحدث ما توصلنا إليه حاليًّا من فهم وقدرات من منظور علم الفيزياء ومن منظور التكنولوجيا، فسوف تتطلب محطات القوى الاندماجية في المستقبل مزيداً من التطورات. وتحديد هذه التطورات هو أحد المهام العديدة البالغة الأهمية التي يضطلع بها مشروع إيتير.»

وسوف يتوقف تصميم وتشييد مفاعلات الاندماج في المستقبل على ما يتحقَّق من نتائج تقنية وتكنولوجية وفي مجال المواد، سواءً في مشروع إيتير أو في غيره من أنشطة البحث والتطوير الراسخة المنسقة المتعددة الجنسيات، بيد أنَّ المسافة التي تفصلنا عن مستقبل تضيئه طاقة الاندماج ما فتئت تتضاءل يوماً بعد يوم.

توحيد جهود البلدان من خلال البحوث والتعاون في مجال الاندماج

بقلم إيلودي بروسار

يقول الكاتب نورمان فنسنت بيل: «ضع نصب عينيك أن تبلغ القمر، فإن ضللت الطريق انتهى بك الحال بين النجوم.» وفي مجال الاندماج النووي، يضع العلماء نصب أعينهم بلوغ النجوم، حيث يسعون إلى اكتشاف إمكانية توليد الكهرباء من الطاقة الاندماجية على النطاق الصناعي هنا على كوكب الأرض.

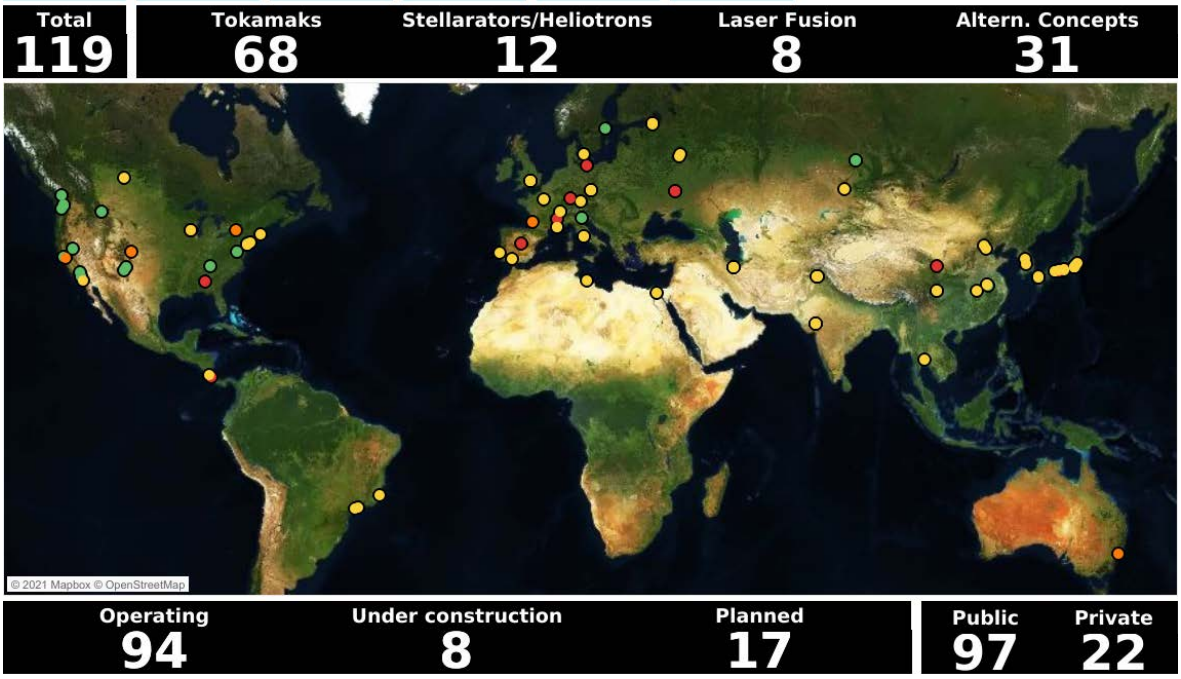
وعلى الصعيد العالمي، يشارك خبراء من نحو ٥٠ بلداً في إجراء البحوث المتعلقة بفيزياء البلازما وتطوير تكنولوجيا الاندماج النووي. ويعمل العديد من هذه البلدان على تكثيف البرامج الخاصة ببحوث الاندماج في مواجهة الزيادة الحثيثة في الطلب على الطاقة وتسارع وتيرة تغير المناخ من جرَّاء حرق الوقود الأحفوري.

وبغية تيسير الجهود الدولية الجارية، توفِّر الوكالة لدولها الأعضاء مجموعة من الأنشطة البحثية وأنشطة بناء القدرات — في بعض الأحيان على المستوى الإقليمي — للمساعدة على سدِّ الفجوات بين البلدان من حيث المعارف والخبرات المتعلقة بالاندماج.

وعلى مدى ٥٠ سنة مضت، قدَّمت الوكالة الدعم لجهود البحث والتطوير في مجال الاندماج النووي حول العالم من خلال تنظيم طائفة متنوعة من المحافل المعنية بالاندماج، بما في ذلك عقد المؤتمر الدولي المعني بطاقة الاندماج كلَّ سنتين. وتنظِّم الوكالة أيضاً سلسلة من حلقات العمل حول مفاهيم محطات قوى الاندماج الإيضاحية، وسلسلة من الاجتماعات التقنية بشأن المواضيع المتصلة بالعلوم والتكنولوجيا في مجال الاندماج، كما تتولى تنسيق أنشطة بحثية تجمع من خلالها بين المؤسسات والعلماء لتناوُل أهم المسائل ذات الاهتمام المشترك.

وتُصدر الوكالة منشورات معنية بمجال الاندماج، منها مجلة الاندماج النووي وسلاسل أخرى، ومن ثمَّ تعمل على نشر المعارف والمعلومات وتساعد على تيسير انتشار المعارف المتقدِّمة في الأوساط العلمية. وتتعهَّد الوكالة أيضاً بوابة الاندماج الإلكترونية وقاعدة بيانات أجهزة الاندماج، كما أنشأت مجموعة مكتبات البيانات الرقمية للبيانات الجزيئية والنووية الأساسية والتي تمثِّل مورداً لا غنى عنه لإجراء البحوث وتطوير التكنولوجيا في مجال الاندماج. وبالتعاون مع العديد من الشركاء الآخرين، تنظِّم الوكالة وتدعم أيضاً أنشطة تعليمية وتدريبية بشأن الاندماج، بما يشمل دورات دراسية وحلقات عمل دولية وإقليمية.

ومنذ انضمام كوستاريكا مؤخراً إلى مشهد الاندماج العالمي، بدأت تتلقى الدعم من الوكالة لسدِّ الفجوة بينها وبين سائر البلدان من خلال التطوير التقني وبناء القدرات. وفي عام ٢٠١٩، نظَّم معهد التكنولوجيا في كوستاريكا بدعمٍ من الوكالة حلقة عمل أتاحت لعلماء من بلدان في منطقة أمريكا اللاتينية فرصة المشاركة في



يوجد حاليًّا ما يزيد على ١٠٠ من أجهزة الاندماج (التابعة للقطاع العام وللقطاع الخاص)، إمَّا قيد التشييد أو قيد التخطيط.

(المصدر: نظام المعلومات عن أجهزة الاندماج التابع للوكالة).

جهاز التوكاماك من طراز HT-6M، المتبرَّع به لتايلند في عام ٢٠١٨، وهو من الركائز الرئيسية في خريطة الطريق التي وضعها ذلك البلد في مجال الاندماج.

(الصورة من: معهد فيزياء البلازما التابع للأكاديمية الصينية للعلوم، الصين)

تجارب مشتركة وتلقي التدريب على تشغيل جهازي اندماج صغيرين يستضيفهما المعهد.

تعزيز الصلات بين البلدان الرائدة والمشاركة في مجال الاندماج

تشترك ستة بلدان مع الاتحاد الأوروبي، من خلال اليوراتوم، في التعاون على إجراء أكبر تجربة اندماج في العالم، ألا وهي مفاعل الاندماج التجريبي الجاري تشييده حاليًّا في فرنسا والمعروف باسم مفاعل إيتير (انظر المقالة، الصفحة ١٠).

ويقول السيد داناس ريديكاس، رئيس قسم الفيزياء بالوكالة: «تؤدِّي الوكالة دوراً مهمًّا في سدِّ الفجوات لفائدة البلدان غير المشاركة في مشروع إيتير، حيث تعمل على نشر المعارف المكتسبة من المشروع في الأوساط الأوسع نطاقاً والعكس عن طريق عقد الاجتماعات التقنية وحلقات العمل والدورات الدراسية وإعداد مواد التعلُّم الإلكتروني، وكلُّ ذلك بمشاركة خبراء من مشروع إيتير.»

إلهام جيل جديد في جنوب شرق آسيا

منذ أن بدأ في عام ٢٠١٤ عقد الدورة الدراسية بشأن البلازما والاندماج النووي لبلدان رابطة أمم جنوب شرق آسيا (رابطة «آسيان»)، أضحت هذه الدورة الدراسية أحد الأنشطة الرئيسية الرامية إلى استهلال برنامج للاندماج في تايلند وللنهوض ببحوث الاندماج في المنطقة. وفي كانون الثاني/يناير ٢٠٢٠، اشتركت الوكالة ومشروع إيتير في دعم الدورة الدراسية من أجل الترويج للتفاعل بين المواهب الشابة والباحثين الرواد على الصعيد الدولي. وتقول كانتشاليكا ديتشاتيس، رئيسة إدارة التعاون الدولي في معهد تايلند للتكنولوجيا النووية: «حرص الخبراء الذين وفَّرتهم الوكالة على تقاسُم معارفهم وخبراتهم وكانوا مصدر إلهام كبير لجيل الشباب.» وشارك في الدورة الدراسية ما يزيد على ٨٠ من الباحثين الشباب من المنطقة.

وفي سبيل تعزيز التدريب والتعاون بين الأفرقة البحثية في البلدان المتقدمة النمو والبلدان النامية، تقود الوكالة منذ عام ٢٠٠٤ مشروعاً بحثيًّا منسقاً بشان أجهزة الاندماج الصغيرة والمتوسطة الحجم يجمع بين باحثين من ١٩ بلداً. ويقول السيد بونياريت تشاتهونغ، الأستاذ المساعد بجامعة أمير سونغكلا في تايلند: «إنَّ هذا المشروع يمثِّل فرصة للباحثين في تايلند حتى يلتقوا ويعملوا بالتعاون مع الكثير من الخبراء حول العالم.»

وتتيح هذه الشراكة القائمة منذ وقت طويل إجراء التجارب المشتركة والمقارنة، وتدريب الموظفين في مختلف المؤسسات والبلدان، وتوعية جيل جديد من علماء الاندماج بأحدث النظريات والتقنيات. ويقول السيد تشاتهونغ: «عمَّا قريب، سوف يكون لدى تايلند جهاز اندماج للمرَّة الاولى على الإطلاق، وسوف يمكِّننا هذه المشروع من استهلال برنامج الاندماج الخاص بنا.»

ويجري حاليًّا تشييد جهاز توكاماك تجريبي (انظر المقالة، الصفحة ٦) في تايلند، وهو النشاط المحوري في برنامج تطوير الاندماج في ذلك البلد. وسيكون هذا الجهاز هو أول جهاز اندماج تشغِّله رابطة «آسيان» وسيمثِّل منصة تعلُّم بالغة الأهمية للباحثين في تايلند وسائر بلدان المنطقة.

وفي عام ٢٠١٨، خصَّصت الوكالة منحاً لتمكين باحثين ومهندسين تايلنديين من حضور مؤتمر الوكالة للطاقة الاندماجية الذي عُقد في الهند. وفي العام نفسه، انضمَّ باحث من تايلند أيضاً إلى الدورة الدراسية بشأن فيزياء البلازما، التي عُقدت في إيطاليا بالاشتراك بين مركز عبد السلام الدولي للفيزياء النظرية والوكالة، وجمعت بين قرابة ٧٠ مشاركاً من طلَّاب المراحل المتقدمة من الدكتوراه والباحثين في مرحلة ما بعد الدكتوراه وباحثين شباب آخرين من ٢٣ بلداً، في إطار الجهود الرامية إلى تعزيز التعاون الدولي.

"عمَّا قريب، سوف يكون لدى تايلند جهاز اندماج للمرَّة الاولى على الإطلاق، وسوف يمكِّننا هذه المشروع من استهلال برنامج الاندماج الخاص بنا."

— بونياريت تشاتهونغ، أستاذ مساعد بجامعة أمير سونغكلا في تايلند

الاندماج: سيكون جاهزاً حين يحتاجه المجتمع

بقلم مايكل أمدي مادسن

لم يزل العلماء يروِّجون لإمكانات توليد الطاقة من الاندماج منذ عشرينات القرن الماضي، بيد أنَّ تنفيذ الاندماج على نطاق تجاري كان حلماً بعيد المنال حتى وقت قريب للغاية. ولفهم الأسباب التي حالت، رغم عقود طويلة من البحوث، دون أن تصبح طاقة الاندماج جزءاً من مزيج الطاقة العالمي حتى الآن، ولماذا أوشك ذلك على أن يتغيَّر، أجرينا هذا الحوار مع السيدة ميلاني وندريدج، مديرة رابطة صناعة الاندماج بالمملكة المتحدة، ومستشارة الاتصالات لشركة *Tokamak Energy*، ومؤسسة منصة *Fusion Energy Insights*.

سؤال: هناك مزحة قديمة تقول إنَّ 'الاندماج النووي هو التكنولوجيا التي دائماً ما يفصلنا عنها ٣٠ عاماً' — فهل هي مقولة صادقة؟

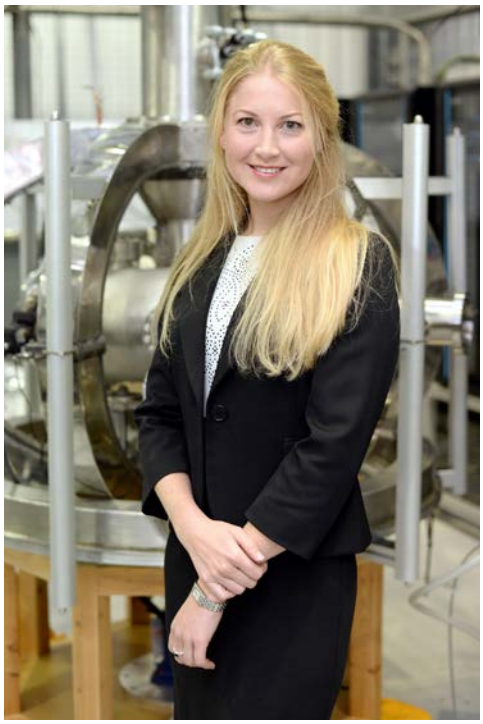
جواب: بالطبع هذه مزحة شهيرة حول الاندماج، لكنها تدعو للأسف بعض الشيء أيضاً، لأنَّ واقع الأمر هو أنَّ مجال الاندماج يشهد تقدُّماً مستمرًّا، واليوم تتضافر عدَّة عوامل صوب التعجيل بالتطورات في هذا المجال. ومن هذه العوامل أنَّ العلوم ذات الصلة قد وصلت إلى مرحلة النضج — فقد صار لدينا الآن فهم جيِّد لفيزياء البلازما، وتمَّ تحقيق التفاعلات الاندماجية بالفعل من خلال مفاهيم تصميمية مثل أجهزة التوكاماك. وبالإضافة إلى ذلك، فقد ظهرت تكنولوجيات جديدة مثل الحوسبة العالية الأداء لتحسين عمليات محاكاة البلازما ونمذجتها؛ والذكاء الاصطناعي والتعلُّم الآلي للوصول بالعمليات إلى المستوى الأمثل والتحكُّم فيها؛ والموصِّلات الفائقة في درجات الحرارة المرتفعة والتي يمكن أن تُنتج مجالات مغناطيسية أقوى كثيراً لأغراض احتواء الوقود المستخدم في الاندماج. وأنواع الليزر المتاحة اليوم صارت أقوى وأكفأ كثيراً بحيث يمكن أن تدعم الاندماج القائم على الاحتواء بالقصور الذاتي، ويمكن للتطورات التي تحقَّقت في التصنيع أن تساعد على خفض تكاليف التجارب ومحطات القوى النووية في المستقبل.

ومن المهم أنَّ هناك الآن إقبال أكبر من جانب الجمهور على الحلول المناخية، وأنَّ الحكومات تستهدف خفض الانبعاثات إلى مستوى الصفر. وهناك أيضاً قطاع الاندماج الخاص، الذي اجتذب حتى الآن استثمارات تقترب من مليارين من الدولارات الأمريكية. وقد نمت رابطة صناعة الاندماج الآن فصارت تضمُّ نحو ٢٥ عضواً، وحتى شركات النفط والغاز بدأت تُبدي اهتمامها بالاندماج.

سؤال: في سبيل التصدي لتغيُّر المناخ، هناك العديد من البلدان التي تهدف إلى إزالة الكربون على نطاق واسع بحلول عام ٢٠٣٠ والوصول إلى الحيادية الكربونية بحلول عام ٢٠٥٠. فهل سيأتي الاندماج بعد أن يكون الأوان قد فات على المساهمة في تحقيق الفارق؟

جواب: كما قال عالم الفيزياء الروسي ليف أرتسيموفيتش ذات مرة: «سيكون الاندماج جاهزاً حين يحتاجه المجتمع.» وأظنُّه محقًّا في ذلك. فمن الناحية المثالية، كان من الأفضل أن نكون قد حلَّلنا المسائل المتعلقة بالاندماج قبل ٣٠ عاماً لكي يكون اليوم جاهزاً للنشر. لكن الظروف السائدة فيما مضى لم تكن مناسبة للاندماج، ولم يكن هناك النوع المناسب من الزخم أو الإمكانية لتحقيقه.

ولذلك فحتى إذا لم يكن الاندماج جاهزاً للمساهمة في مستهدفات عام ٢٠٥٠، ستكون هناك حاجة له في النصف الثاني من القرن بسبب استمرار الزيادة في الطلب على الطاقة. لكنَّ علينا الآن أن ندفع للأمام بقوة بهدف توصيل القوى الاندماجية بالشبكة الكهربائية قبل عام ٢٠٥٠.



"حتى إذا لم يكن الاندماج جاهزاً للمساهمة في مستهدفات عام ٢٠٥٠، ستكون هناك حاجة له في النصف الثاني من القرن بسبب استمرار الزيادة في الطلب على الطاقة."

— ميلاني وندريدج، مديرة رابطة صناعة الاندماج في المملكة المتحدة

سؤال: في رأيكِ، ما هي أهم العقبات التي يمكن أن تحول دون تقدُّم تكنولوجيا الاندماج وكيف يمكن تلافيها؟

جواب: هناك مجموعة متنوعة من التحديات التي لا بد لنا من التغلُّب عليها في مراحل مختلفة. وأول هذه التحديات هو أن يؤدي التفاعل الاندماجي إلى إنتاج قدر من الطاقة أكبر من القدر المستخدم لتحقيقه. ونحن نطلق على هذا المعلم البارز اسم «نقطة التعادل». وبعد تجاوز نقطة التعادل، سيكون علينا أن نشيِّد محطة تجريبية قادرة على توليد الكهرباء. وبعد النجاح في ذلك، يمكننا التفكير في النشر التجاري.

وهناك عقبات تقنية بين الوصول إلى نقطة التعادل وإنتاج الكهرباء للمرة الأولى، ومنها كيفية استخلاص الطاقة واستيلاد المزيد من وقود التريتيوم. كما أنَّ البيئة التي يجري فيها الاندماج تتطلب شروطاً خاصة من حيث المواد. فهي تتطلب مستويات متطرفة من الحرارة والبرودة في حال استخدام المغناطيسات الفائقة التوصيل، كما تتطلب مجالات مغناطيسية قوية. بيد أنَّ النيوترونات النشطة هي العنصر الأكثر إشكالية، لأنَّها يمكن أن تتسبب في أضرار بالغة للمواد. ومن ثمَّ فمن المرجح للغاية أنَّه سيلزم تغيير بعض مكوِّنات محطات القوى من فترة إلى أخرى، ولذلك يتعيَّن تصميم المفاعل هندسيًّا بحيث يمكن تنفيذ ذلك بسرعة وسهولة وبمراعاة الجدوى الاقتصادية.

وفيما يتجاوز نطاق الفيزياء والهندسة، فإنَّ على الأوساط المعنية بالاندماج أيضاً أن تتحاور مع الحكومات بشأن التنظيم الرقابي، بحيث لا نواجه عراقيل فيما يتعلق بالترخيص حين نكون جاهزين لبدء التشييد. وختاماً، فهناك العنصر المتعلق بالقبول العام وضمان موافقة الجمهور على الأخذ بالاندماج أيضاً. وعلينا أن نفكر في كلِّ هذه المسائل وأن نبدأ في التحاور بشأنها من الآن، ونحن بصدد ذلك بالفعل.

سؤال: هناك اليوم ما يقرب من ٨٠٠ مليون نسمة يعيشون دون مصدر كهرباء يُعوَّل عليه. فهل الاندماج النووي يوفِّر حلًّا لأولئك الناس، وما هي الجهود التي يبذلها القطاع من أجل إشراك البلدان النامية؟

جواب: حين ظهرت للمرة الأولى فكرة مشروع الاندماج العالمي، أو مشروع إيتير، خلال اللقاء الشهير بين الرئيسين ريغان وغورباتشوف بجوار المدفأة في جنيف في عام ١٩٨٥، قال الرئيسان إنَّهما يريدان أن يكون الاندماج متاحاً للبشرية جمعاء، ولا يزال هذا هو الهدف المنشود. ويجري التخطيط الآن في إطار مشروع إيتير لبرنامج تعليمي يُتاح لجميع البلدان، بهدف بناء القوة العاملة في مجال الاندماج في المستقبل. وسيكون هذا الأمر مهمًّا إذا ما كنا نخطِّط لنشر الاندماج حول العالم.

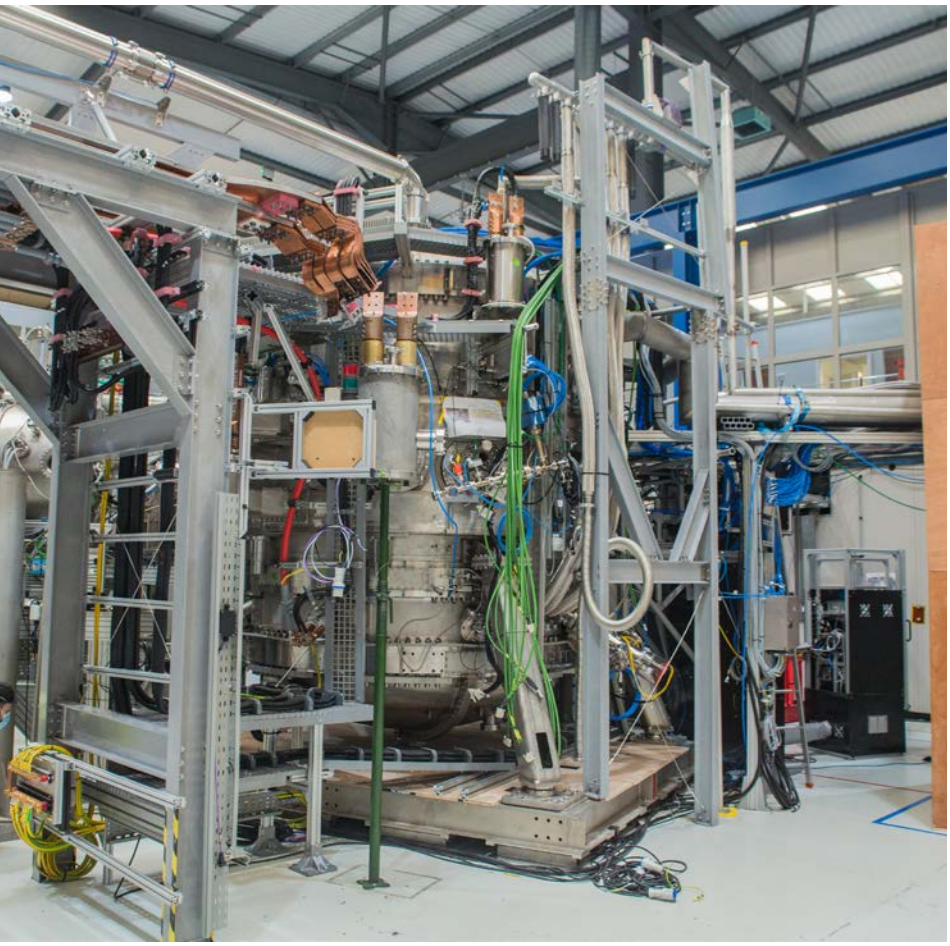
وهناك تعاونٌ ناشئ بين القطاعين العام والخاص سوف يساعد على خفض التكاليف وتقاسُم المخاطر. وسوف تكون لهذا التعاون بين القطاعين العام والخاص أهمية خاصة في البلدان النامية، ومن المرجح أنَّه سيتطلب مساعدة حكومية دولية.

سؤال: من المعتاد أنَّ علم الفيزياء والمجال النووي من المجالات التي يهيمن عليها الرجال، فما الذي يجري عمله في مجال الاندماج حتى يكون قطاعاً أكثر توازناً بين الجنسين؟

جواب: الوعي باختلال التوازن بين الجنسين في علم الفيزياء وفي مجال الاندماج قائمٌ منذ فترة طويلة، وهناك مبادراتٌ تهدف إلى تغيير ذلك، لكنَّ التغيير سيأخذ مجراه بوتيرة بطيئة على مدى عدَّة أجيال.

وقد مرَّ عليَّ الآن ما يقرب من ٢٠ سنة شاركت خلالها في المبادرات الرامية إلى تغيير التصورات الجنسانية. وهناك بعض المختبرات الكبرى التي يبذل القائمون عليها محاولات حثيثة لمعالجة مسألة المساواة بين الجنسين من خلال برامج تهدف إلى تحسين مستوى التنوُّع وإقامة الشبكات لتعزيز شمول الجميع. والأمر أكثر صعوبة في حالة الشركات الخاصة، التي عادة ما يكون حجمها صغيراً للغاية.

بيد أنَّ الأمر لا يقتصر على ما يمكن للمختبرات أن تفعله، بل يشمل أيضاً ما يمكن لنا أن نقوم به كأفراد. وقد أنشأت مؤخراً الوسم womeninfusion@ (نساء في مجال الاندماج) على إنستاغرام، لكي أُبرز دور النساء العاملات في المجال وأسهم في تشجيع جيل جديد من الفتيات على الانخراط في مجال الفيزياء.



جهاز التوكاماك من طراز ST40، الذي شيدته وتقوم بتشغيله شركة Tokamak Energy.

(الصورة من: شركة Tokamak Energy)

بين السعي إلى السبق والأداء المضمون

لهذه الأسباب يحتاج الاندماج للمشاريع الريادية والشركات الناشئة

بقلم سايمون وودرف

سايمون وودرف هو مؤسس ورئيس شركة Woodruff Scientific، وهي شركة أمريكية متعاقدة مع مؤسسات خاصة وعامة لتنفيذ أنشطة بحث وتطوير في مجال تكنولوجيا الاندماج بهدف التعجيل بالتطبيق الاقتصادي لطاقة الاندماج. والشركة ناشطة في الأوساط المعنية بالاندماج، حيث تستضيف دورة تمهيدية سنوية لتدريب طلاب المرحلة الجامعية على الحوسبة للأغراض العلمية، وسبق لها أن نظَّمت حلقات عمل في مجال علوم طاقة الاندماج، وهي حاليًا من الجهات المشاركة في مبادرتين من مبادرات الوكالة أولاهما معنية بالمصادر النيوترونية الاندماجية المدمجة والثانية بتطوير الاندماج في القطاع الخاص.

الفرضية الأساسية التي تقوم عليها أنشطة تطوير الاندماج في القطاع الخاص هي أنَّ هناك مسارات عديدة للتسويق التجاري، وأنَّ بوسع روَّاد الأعمال أن يقوموا بدورٍ مكمِّل لدور البرامج الحكومية. وليس علينا إلا النظر إلى صناعة الإطلاق الفضائي لتوضيح هذه النقطة. فقد أدارت حكومة الولايات المتحدة توليفة من البرامج البارعة للشراكة بين القطاعين العام والخاص، مما أدَّى إلى تحقيق وفورات في التكاليف في جميع جوانب قطاع الإطلاق الفضائي. ولنا في شركات مثل «سبيس إكس» (SpaceX) و«بلو أوريجن» (Blue Origin) وغيرهما دليل على ذلك.

ويفكِّر «روَّاد الاندماج» في القطاع الخاص بطريقة مماثلة، ويتساءلون: ماذا عسانا أن نفعل لتقليل التكاليف؟ وكيف يمكننا أن نستخدم آخر الابتكارات في المواد والتكنولوجيا والذكاء الاصطناعي للوصول إلى جعل الاندماج مجدياً من الناحية الاقتصادية؟ وكيف يمكننا خفض إجمالي التكاليف الرأسمالية وتكلفة الكهرباء بحيث يمكن لنظم الاندماج أن تنافس المحطات العاملة بالغاز الطبيعي القائمة على الدورات المركَّبة؟

إنَّني أتابع عن كثبٍ مسار المشاريع الريادية الخاصة العاملة في مجال الاندماج منذ حصلت على منحة دراسية بعد الدكتوراه في مختبر لورانس ليفرمور الوطني في عام ١٩٩٩. وفي ذلك الوقت، كانت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة تتعهَّد برنامجاً بعنوان «مفاهيم الاحتواء الابتكارية»، كان الغرض منه البحث عن مفاهيم أبسط وأيسر تطبيقاً من الناحية الهندسية لتنفيذ الاندماج النووي. وقد ساهمتُ في حينها في تنظيم سلسلة من حلقات العمل في إطار هذا البرنامج وكانت هناك مساحة إيجابية من التقاطع مع مفاهيم الاندماج التي كان يطوِّرها القطاع الخاص. وعلى مسافة قريبة من مختبر ليفرمور، كانت شركة TAE Technologies، التي كان اسمها حينئذ Tri-Alpha Energy، تجهِّز لبدء نشاطها؛ وفي الجهة المقابلة في فانكوفر، كندا، كانت شركة General Fusion تستهل عملها، وفي المملكة المتحدة كانت شركة Tokamak Energy، التي كان اسمها وقتئذ Tokamak Solutions، قيد التأسيس أيضاً.

وقد تركتُ مختبر لورانس ليفرمور في عام ٢٠٠٤ لكي أحذو حذو هؤلاء الروَّاد لنرى ما إذا كان بوسعنا أن نسهم حقًّا في التعجيل بطرح نظم الطاقة الاندماجية في الأسواق التجارية. وخلال ٢٢ عاماً مضت منذ التحاقي بمختبر ليفرمور، تمكَّنَت هذه الشركات الرامية إلى «إحراز قصب السبق» في مجال الاندماج مجتمعةً من حشد ما يزيد على ١,٥ مليار دولار أمريكي لمواصلة تطوير مفاهيمها، وبرزت على الساحة صناعة مزدهرة في مجال الاندماج لتدعم هذه الجهود.

ولا ريب في أنَّ المشاريع الريادية الخاصة في مجال الاندماج تقوم على التفاؤل — إلى درجة التهوُّر في كثير من الأحيان. ولأنَّ هذه المشاريع تجمع بين الروح

الريادية والتكنولوجيا المتقدمة، فقد اكتسبت سمعة شبه أسطورية في أوساط الرؤساء التقنيين والرؤساء التنفيذيين في القطاعات الأخرى. لكن لا بدَّ أن نقول إنَّ القطاع تحفُّه الآمال من جميع جوانبه. وقد بدأ العديد من روَّاد الاندماج في القطاع الخاص حياتهم المهنية في برامج حكومية تزيد فيها الفترة المتوقعة للإنجاز على ٢٠ عاماً، لكنهم الآن ينخرطون في مناقشات بشأن اتباع استراتيجية «صفرية التدفُّقات النقدية» وبذل جهود لترشيد الإنفاق في سياق منظومة ريادية مليئة بالشركات الناشئة ذات «الروح القتالية». ويتلقى أولئك الروَّاد الدعم جزئيًّا من خلال الجهود التي تبذلها وكالة المشاريع البحثية المتقدمة في ميدان الطاقة من أجل رأب الصدع بين العمل التقليدي في المختبرات وقطاع الصناعة، من خلال سلسلة من البرامج الصغيرة مثل برامج ALPHA وBETA وGAMOW وOPEN، وأتخيَّل أنَّ تنظيم هذه البرامج سيتواصل في المستقبل.

وقد أصبحت أنشطة تسويق التكنولوجيا (T2M) أيضاً جزءاً من مجال الاندماج. وهناك مناقشات منتظمة بشأن عمليات «خروج المستثمرين» من الشركات الناشئة: هل تُباع الشركة الناشئة إلى جهة أخرى أم تتوجه إلى الأسواق أم تبيع ما لديها من أصول الملكية الفكرية؟ وهل يمكن الخروج قبل انتهاء فترة عمر الصندوق الاستثماري المنشأ للشركة المعنية؟

ومنذ مغادرتي مختبر لورانس ليفرمور، أُتيحت لي فرصة أن أتَّخذ لنفسي مهنةً من العمل مع المشاريع الريادية الخاصة العاملة في مجال الاندماج، بدءاً من شركة ناشئة مهتمة بالاندماج القائم على الاحتواء الصوتي، مقرها في غراس فالي، كاليفورنيا، إلى شركة أسَّستها مجموعة من خريجي معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا وتمكَّنت من حشد مبلغ مذهل قدره ٢٠٠ مليون دولار أمريكي في جولتها الاستثمارية الأولى. ومن الواضح أنَّ هناك اهتماماً متجدِّداً بالوصول إلى مستوى الصفر من حيث كلٍّ من الانبعاثات الكربونية والتدفُّقات النقدية. ويختلف روَّاد الأعمال والمشاريع الريادية من حيث النهج التقني (مع إجماعهم على أنَّ التكنولوجيا الأصغر حجماً هي الأفضل)، كما يختلفون بعض الشيء فيما يتعلق بأفكارهم حول خطة التسويق التجاري — فبعضهم حريصٌ على الأخذ بنهج السعي «لإحراز قصب السبق»، الذي تتركَّز فيه كلُّ الجهود على أن تكون الشركة أول من يقدِّم إلى السوق منتجاً لتوليد الكهرباء. بيد أنَّ الشركات التي تتَّبع هذا النهج (والتي ربما يبلغ عددها ٢٠ شركة حول العالم) لا تشكِّل إلا نسبة ضئيلة من منظومة المنشآت التجارية الصغيرة التي توفِّر منتجات وخدمات تدعم الاندماج.

وفي الولايات المتحدة الأمريكية، هناك برنامج للمنح المخصصة للبحوث الابتكارية التي تجريها المنشآت التجارية الصغيرة، ويقدِّم هذا البرنامج الدعم لمئات من الشركات التي تضطلع بأنشطة لها صلة بالاندماج؛ سواء كانت تصنع الإغنيترونات أو المكثِّفات، أو تجري عمليات المحاكاة، أو تطوِّر أنواعاً جديدة من المواد لاستخدامها في التصنيع بإضافة الطبقات، أو تستكشف تقنيات تشخيصية مستحدثة. والمنشآت الصغيرة تتحمَّل عبئاً أقل من المختبرات الكبيرة من حيث التكاليف العامة. وهي تمتاز بالمرونة ويمكنها أن تغيِّر اتجاهها — فقد تقدِّم نوعاً من المنتجات في سنة ثمَّ تستحدث مجموعة مختلفة من الحلول في السنة التي تليها. كما أنَّها تتمتَّع بالقدرة على الابتكار، ووضع أهم المشاكل في الحسبان والبحث عن حلول لها، والتركيز على العناصر التي من شأنها أن تفضي في نهاية المطاف إلى تمكين طاقة الاندماج من الدخول إلى السوق.

والخلاصة هي أنَّ الشركات الناشئة والمنشآت الصغيرة هي جزءٌ من حاضر الاندماج، والمستقبل واعدٌ أمام الصغار!

تصوُّر للجسيمات العالية الطاقة أثناء تدفُّقها داخل مفاعل قائم على جهاز توكاماك.

(الصورة من: موقع Shutterstock)

سلامة مياه الشرب: وحدة لمعالجة المياه مدعومة من الوكالة تحوِّل مياه المستودعات الجوفية إلى مياه صالحة للشرب في الأردن

وحدة معالجة المياه التي اكتمل تشييدها في كانون الأول/ديسمبر ٢٠٢٠، وهي تيسِّر استخدام مستودعات المياه الجوفية الأقدم عمراً في أحواض الحجر الرملي.

(الصورة من: أمل الصياحين/سلطة المياه بالأردن)

في الأردن، حيث تشكل ندرة المياه مصدر قلق متزايد، تبدأ قريباً وحدة جديدة لمعالجة المياه الجوفية، طُوِّرت بدعم من الوكالة، في ضخ مياه الشرب العالية الجودة إلى آلاف المنازل في محافظة العقبة في الطرف الجنوبي من البلد. وتعمل وحدة المعالجة بنظام معالجة تجريبي، هو الأول من نوعه في الأردن، عن طريق إزالة النويدات المشعة الطبيعية المنشأ من المياه الجوفية، مما يتيح لسلطة المياه بالأردن أن تستفيد من مستودعاتٍ لم يسبق استعمالها ومن ثم تخفيف الضغط على مصادر المياه الحالية.

ويُعدُّ الأردن من بين البلدان العشرة التي تسجِّل أدنى مستويات لنصيب الفرد من توافر المياه العذبة في العالم، بسبب مناخه شبه القاحل الذي يتسم بانخفاض معدلات هطول الأمطار، ونتيجةً للزيادة السكانية. ومن المتوقع أن يتدهور هذا الوضع، فوفقاً لما أفاد به المكتب الإقليمي لمنظمة الصحة العالمية لشرق المتوسط، سوف يدخل الأردن في حالة من «الفقر المائي المدقع» بحلول عام ٢٠٢٥ ما لم تُتخذ تدابير فعالة تحول دون ذلك.

ومن بين هذه التدابير استغلال مصادر المياه الجوفية الأعمق والأقدم عمراً، مثل مستودع المياه الجوفية في وادي رَم المحاط بالحجر الرملي والذي يحتوي على كميات ضخمة من المياه العذبة ذات الجودة العالية والتي لا يُرجَّح أن يظهر بها أيُّ تلوث بشري المنشأ. ومع ذلك، فغالباً ما يحتوي الحجر الرملي على تركيزات عالية من النويدات المشعة الطبيعية المنشأ، لا سيما الراديوم، والتي يمكن أن تشكِّل خطراً على المستهلكين.

وبدعم من برنامج الوكالة للتعاون التقني، ساعد أخصائيون في تحليل النظائر وتكنولوجيا النفايات الخبراءَ في الأردن على قياس ورصد تركيز الراديوم في عينات مأخوذة من مستودع المياه الجوفية في وادي رَم، وعلى استكشاف عدد من خيارات معالجة المياه.

وتمخَّضت نتائج تحليل المياه عن تشييد وتركيب وحدة لمعالجة المياه بالقرب من أحد الآبار. وترشِّح هذه الوحدة المياه بإضافة أكسيد المنغنيز المائي إليها ثمَّ تمريرها عبر سلسلة من المرشِّحات الخزفية، مما يقلِّل تركيز النويدات المشعة إلى مستويات تستوفي المعايير الأردنية.

وبعد وصول المكونات الأساسية الأولى، مثل المضخات وأجهزة القياس، بدأت في شباط/فبراير ٢٠٢٠ أعمال تجميع معدات معالجة المياه، ثمَّ استُهلَّت أعمال الهندسة المدنية وأعمال التشييد في بداية الشهر التالي. وبحلول كانون الأول/ديسمبر ٢٠٢٠، أصبحت وحدة المعالجة كاملة وجاهزة لكي تستخدمها شركة مياه العقبة، وهي السلطة المحلية المعنية بتوزيع المياه. ويمكن للوحدة الجديدة معالجة ٤٠ متراً مكعباً من المياه في الساعة — أي ١٢,٥ لتراً في الثانية — وهو ما يوفِّر كميات من المياه تكفي نحو ٢٠٠٠ شخص.

وتقول السيدة آمال الصياحين، مديرة البحوث والخدمات التقنية في سلطة المياه بالأردن: «نخطط لإنشاء مزيد من وحدات معالجة الموارد المائية في مدينة العقبة، وكذلك في آبار جوفية جديدة في المنطقة الجنوبية من محافظة عَمَّان، في منطقة تسمى خان الزبيب.»

وتحتوي جميع المواد الموجودة في القشرة الأرضية على نويدات مشعة طبيعية المنشأ متناثرة داخل الصخور وفي التربة، عادةً بتركيزات منخفضة النشاط. ومع ذلك، يمكن أن تتسرب هذه النويدات المشعة إلى المياه الجوفية، ومن ثمَّ إلى مياه الشرب المستخرجة من مصادر المياه الجوفية وينابيعها. ويقول السيد هورست مونكن-فرنانديز، وهو أخصائي في مجال الاستصلاح البيئي بالوكالة وأحد القائمين على مساعدة الأردن في هذا المشروع: «إنَّ وجود النويدات المشعة في المياه قد يتطلب إجراء تحليل دقيق لفهم المخاطر الإشعاعية المرتبطة باستهلاكها.»

ويمثل النشاط الإشعاعي في مياه الشرب مشكلة في العديد من بلدان العالم. وقد نظَّمت الوكالة مؤخراً حلقة عمل ضمن فعاليات المؤتمر الدولي بشأن إدارة المواد المشعة الموجودة في

البيئة الطبيعية في قطاع الصناعة، بعنوان Groundwater 360o (نظرة شاملة على المياه الجوفية)، واستكشفت حلقة العمل جوانب متنوعة متصلة بوجود النويدات الطبيعية المنشأ في المياه الجوفية.

الأساس العلمي

تتسم المياه الجوفية المستخرجة من أحواض الحجر الرملي في الشرق الأوسط بالجودة العالية في معظمها. ومع ذلك، فغالباً ما يحتوي الحجر الرملي بحكم تكوينه على مستويات مرتفعة من النويدات المشعة الطبيعية المنشأ الموجودة بتركيزات نشطة. وفي حالة الأردن، يمكن لمستويات نويدات الراديوم الطبيعية المنشأ أن تقوِّض جودة المياه الجوفية بسبب الخصائص المسرطنة التي تتسم بها.

بيد أنَّه يمكن إزالة الراديوم من المياه باستخدام مرشِّح مكوَّن من غشاء من كربيد السيليكون بالإضافة إلى طبقة من أكسيد المنغنيز المائي.

ومع مرور الماء عبر المرشِّح، يمتصُّ أكسيد المنغنيز المائي الراديوم. وبعد فترة زمنية معينة، يخضع المرشح الخزفي «للتنظيف بالتمرير العكسي»، ويجري التخلُّص من أكسيد المنغنيز المائي المحتوي على الراديوم الممتص ضمن النفايات.

— بقلم عمر يوسف

تحسين ممارسات إدارة التربة والمغذيات يؤدي إلى زيادة غلَّة محصول الأرز في جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية

تجربة إيضاحية للأرز في حقل أحد المزارعين.

(الصورة من: محمد زمان/الوكالة)

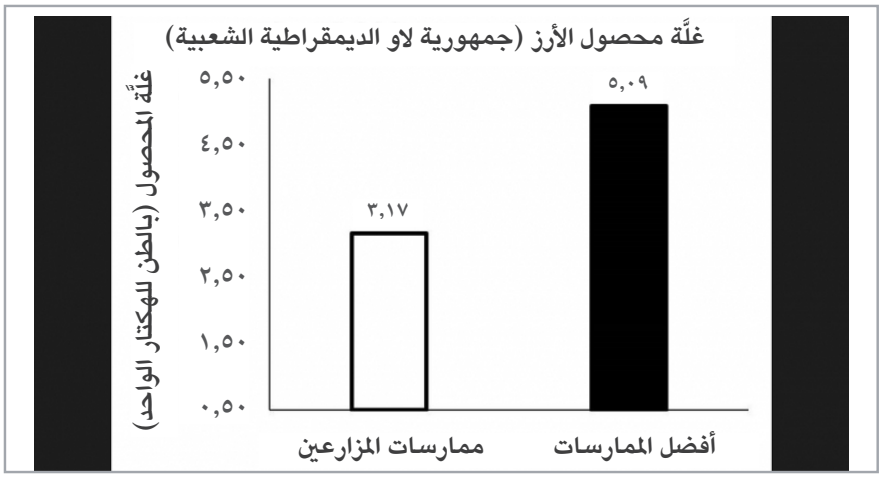
الأرز هو أهم المحاصيل الأساسية في جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية، وهو عنصر محوري في تحقيق الأمن الغذائي وتوفير فرص العمل. وتزيد نسبة من يزرعون الأرز في ذلك البلد على ٨٠ في المائة من جملة المزارعين، كما يستأثر محصول الأرز بنحو ٦٠ في المائة من المساحة المزروعة. ومع ذلك، فقد أدَّت جملة من العوامل إلى الحدِّ من غلَّة محصول الأرز، لتهدِّد سُبُل العيش في هذا المجتمع الزراعي. وتشمل هذه العوامل الطبيعة الجبلية التي تتَّسم بها تضاريس البلد، والمناخ الاستوائي الذي تكثُر فيه التقلُّبات الموسمية، وتآكل التربة، وعدم توافر أصناف الأرز المناسبة، وعدم استخدام الأسمدة بالقدر الكافي. وبالنظر إلى اعتماد المزارعين على الأمطار الطبيعية في ٧٢ في المائة من المساحة التي يُزرع فيها الأرز في البلد، فمن المتوقع أنَّ التقلُّبات المتزايدة الاضطراب في أنماط هطول الأمطار والناجمة عن تغيُّر المناخ سوف يكون لها تأثير مدمِّر في إنتاج الأرز.

وقد قدَّمت الوكالة، بالتعاون مع منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو)، الدعم للمزارعين في جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية لزيادة غلَّة محصول الأرز بنسبة ٦٠ في المائة من خلال اتِّباع ممارسات أفضل في إدارة التربة والمغذيات بعد تحديد هذه الممارسات باستخدام التقنيات النووية (انظر «الأساس العلمي»). وأوضحت التجارب التي أُجريت في حقول المزارعين أنَّه مع استخدام الأسمدة الكيميائية والعضوية بالطريقة المثلى، زادت غلَّة محصول الأرز من ٣,١٦ أطنان للهكتار إلى ٥,١ أطنان للهكتار.

ويقول السيد سومفيت سيفاندون، المزارع في مقاطعة ساناكارم بإقليم فيينتيان، وهو أحد المشاركين في مشروع تجريبي للأخذ بهذه النتائج في الممارسة العملية: «إنَّني أطبِّق هذه الممارسات منذ ثلاث سنوات. وقد زادت غلَّتي بنسبة ٦٠ في المائة مقارنة بممارساتنا التقليدية. لقد تعرَّفنا على تقنيات زراعية تتَّسم بالكفاءة والفعالية من خلال التدريب الذي تلقيناه، وأدى الأخذ بها في حقولنا إلى نتائج جيدة. وبفضل البرنامج، صرنا أكثر قدرة على مقاومة تغيُّر المناخ وزاد حصادنا.»

ودرَّبت الوكالة، من خلال برنامجها للتعاون التقني، باحثين على استخدام النتروجين-١٥، وهو نظير مستقر من نظائر النتروجين، لتحديد كمية النتروجين التي تمتصُّها النباتات من الأسمدة، ومن ثمَّ تحديد كمية الأسمدة التي ينبغي أن يستخدمها المزارعون بالضبط في مراحل مختلفة من عمر المحصول، كما درَّبتهم على كيفية إدماج قشِّ الأرز وروث الحيوانات المتوفرَيْن محليًّا ضمن الأسمدة المستعملة باعتبارهما من مصادر المغذيات.

وبناءً على هذه النتائج، ساعد خبراء من الوكالة والفاو أخصائيين محليين على وضع مجموعة من المبادئ التوجيهية بشأن إنتاج الأرز لفائدة المزارعين والموظفين الزراعيين العاملين معهم. وتقدِّم هذه المبادئ التوجيهية مجموعة من أفضل الممارسات بشأن إدارة التربة والمغذيات، وتستند إلى نتائج جرى الحصول عليها باستخدام التقنيات النظيرية.



رسم بياني يوضح الزيادة في غلَّة محصول الأرز باستخدام الممارسات المحسَّنة بشأن التربة والمغذيات.

وبغية الوصول إلى عدد أكبر من المزارعين ونشر هذه المجموعة من أفضل الممارسات، وضعت الوكالة بالتعاون مع خبراء من المعهد الوطني لبحوث الزراعة والغابات كتيِّباً سهل الاستعمال للمزارعين باللغة اللاوية، باستخدام المعلومات الواردة في المبادئ التوجيهية بشأن إنتاج الأرز. وحتى الآن، بلغ عدد المزارعين الذين تلقوا التدريب في المرحلة التجريبية من البرنامج ٥٧ مزارعاً في أربع قرى في إقليم فيينتيان.

ويقول السيد محمد زمان، وهو أحد العلماء المتخصصين في مجال التربة وتغذية النباتات بالبرنامج المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة: «يُعدُّ الكتيِّب بمثابة صندوق كامل من الأدوات التكنولوجية التي تبيِّن للمزارعين ما يتعيَّن فعله بالضبط، بدءاً من تجهيز الأرض لغرس البذور ومروراً باستعمال الأسمدة والتصدِّي للحشائش والحشرات، وحتى التأكُّد من جمع الحصاد في الوقت المناسب.»

الأساس العلمي

تقنيات النظائر المستقرة

النظائر هي صور من العنصر نفسه تشتمل ذراتها على نفس العدد من البروتونات، ولكن على عدد مختلف من النيوترونات. وعلى سبيل المثال، فالنتروجين-١٥ يتصرف بطريقة مماثلة للنتروجين-١٤ من الناحية الكيميائية، لكن ذراته تحتوي على نيوترون واحد إضافي، مما يجعلها أثقل وزناً. ويمكن للعلماء أن يستخدموا أسمدة موسومة بهذا النظير لفهيم الكيفية التي يؤدي بها النتروجين الموجود في الأسمدة إلى تغييرات في نظم التربة والنباتات والمياه، من خلال تتبُّع هذا النظير وتحديد مدى فعالية امتصاص المحاصيل له والكمية التي تتبقى منه في التربة.

ويمكن للعلماء أيضاً أن يستخدموا النظائر لتتبُّع مجموعة متنوعة من الانبعاثات الزراعية في تحرُّكاتها ومنشئها: عن طريق استخدام النتروجين-١٥ لتتبُّع أكسيد النيتروز والكربون-١٣ لتتبُّع الميثان وثاني أكسيد الكربون.

— بقلم لو هان

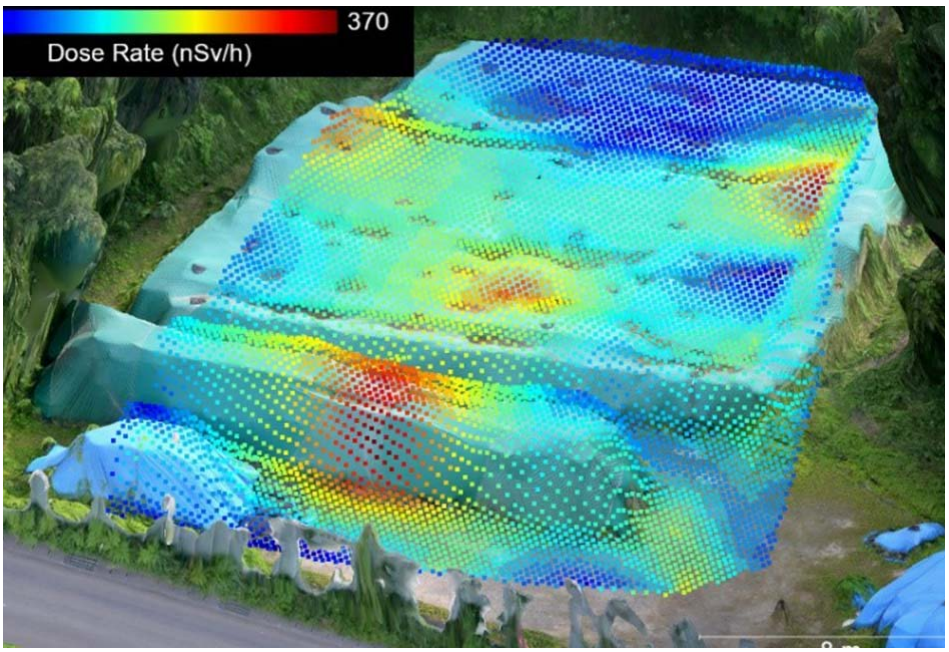
تكنولوجيا جديدة متاحة الآن: استخدام الطائرات بلا طيار لأغراض الرصد الإشعاعي في حالات الطوارئ

تكنولوجيا جديدة قائمة على الطائرات بلا طيار استحدثتها الوكالة لفائدة سلطات محافظة فوكوشيما باليابان، تمكِّن من إجراء القياسات الإشعاعية في المناطق الملوَّثة.

(الصورة من: محافظة فوكوشيما)

في أعقاب حادث نووي من قبيل الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في عام ٢٠١١، يمكن أن يبلغ التلوُّث الإشعاعي في المنطقة القريبة من المفاعل المتضرر مستوى خطيراً إلى درجة لا تسمح بدخول البشر إلى المنطقة لأغراض الرصد الإشعاعي. وسوف يكون الاضطلاع بهذه المهمة أيسر في المستقبل، بفضل تكنولوجيا جديدة قائمة على الطائرات بلا طيار استحدثتها الوكالة لفائدة سلطات محافظة فوكوشيما باليابان.

وقد طوَّرت الوكالة المنهجية والأجهزة اللازمة لاستخدام طائرات بلا طيار مزوَّدة بكاشفات إشعاعية وكاميرات وأجهزة ملاحة قائمة على النظام العالمي لتحديد المواقع، وخضعت المنهجية والأجهزة للاختبار والتحقُّق في ظروف واقعية في محافظة فوكوشيما، وصارت التكنولوجيا الجديدة متاحة الآن للاستخدام العملي في الأوضاع الروتينية أو في حالات الطوارئ.



مسحٌ تصويري جوي كامل ثلاثي الأبعاد متراكب مع خريطة إشعاعية، أُعدَّ بناءً على البيانات التي جمعتها طائرة واحدة بلا طيار في رحلتين جويتين متعاقبتين.

(الصورة من: الوكالة ومحافظة فوكوشيما)

وبناءً على هذه الخبرة، فإنَّ الوكالة جاهزة لمساعدة الدول الأعضاء المهتمة على الأخذ بهذه التكنولوجيا وتنفيذها لأغراض رسم الخرائط الإشعاعية في أعقاب الطوارئ النووية أو الإشعاعية.

وتكفل هذه التكنولوجيا مزيتين مهمتين هما انخفاض تكلفة الطائرات بلا طيار وتلافي التعرُّض البشري للإشعاعات.

وكانت الوكالة ومحافظة فوكوشيما قد شرعتا في العمل معاً لأول مرة على تطوير الطائرات بلا طيار واستخدامها لأغراض الرصد الإشعاعي في عام ٢٠١٢. وفي إطار خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي، قدمت الوكالة المساعدة لمحافظة فوكوشيما عبر مشروعين متتاليين في الفترة من عام ٢٠١٢ إلى عام ٢٠٢٠، من خلال ما يلي:

- توفير نظام كامل من الأجهزة قائم على استخدام طائرات بلا طيار لأغراض القياسات الإشعاعية — وهو نظام للكشف عن الإشعاعات مُزَوَّد بقدرات على معالجة البيانات وخزنها — طوَّره وشيَّده مختبر العلوم والأجهزة النووية؛
- وتوفير منهجية لتحليل وتفسير البيانات بعد القياس، وكذلك تدريب الموظفين في كلٍّ من محافظة فوكوشيما ومختبر العلوم والأجهزة النووية في زايبرسدورف بالنمسا على استخدام الطائرة بلا طيار ونظام الأجهزة الخاص بها، وعلى استخدام البرامج الحاسوبية للحصول على البيانات وتفسيرها.

وقد تحققت في الآونة الأخيرة طفرات كبرى في تكنولوجيا الطائرات بلا طيار، ويُتوقع أن تطرأ تطورات جوهرية أخرى في المستقبل القريب، بما يشمل زيادة حمولة الطائرة، وتزويدها بكواشف وأجهزة استشعار متكاملة، وتحسين الملاحة الذاتية وقدرة الطائرات على العمل مع غيرها من الطائرات بلا طيار ومع النظم الأرضية. وتعمل الوكالة حاليًّا على دمج واختبار أجهزة جديدة ومحسَّنة، بما يشمل تكييف هذه الأجهزة لكي تكون متوافقة مع الجيل التالي من الطائرات بلا طيار.

ويقول السيد داناس ريديكاس، رئيس قسم الفيزياء في الوكالة: «سوف تؤدي هذه التطورات الجديدة إلى إطالة فترة تحليق الطائرات بلا طيار، من ناحية، والتمكين من تحديد معدلات مكافئات الجرعات وأطياف أشعة غاما من خلال عملية قياس واحدة، من ناحية أخرى. وبالجمع بين النظام الجديد والقدرات التي تتيحها الكاميرات العالية الجودة، سيُتاح للمستخدمين الحصول على نموذج مسح تصويري جوي كامل ثلاثي الأبعاد متراكب مع الخرائط الإشعاعية وبيانات تحديد أنواع النويدات المشعة».

وأوضح السيد ميروسلاف بيناك، رئيس قسم الأمان والرصد الإشعاعيين في الوكالة أنَّ التكنولوجيات القامة على الطائرات بلا طيار سيكون لها دور حاسم الأهمية في النهوض بالرصد الإشعاعي، بما يشمل تعزيز تطبيقات رسم الخرائط البيئية وتحسين الرصد الطويل الأجل للمناطق الملوثة.

ويمكن استخدام ما يُجمع من البيانات باستخدام نظم الطائرات بلا طيار التي طورتها الوكالة وتحقَّقت منها محافظة فوكوشيما لتقييم المخاطر الإشعاعية المحتملة والمساعدة على وضع خطط واستراتيجيات مناسبة للاستصلاح وإزالة التلوث والتصرف في النفايات النووية في اليابان.

ومن المزمع أن تُصدر الوكالة وثيقة تقنية مفصَّلة تُتاح علناً حول نتائج المشروعين، بما يشمل معايرة الأجهزة والتحقُّق من صحة المنهجية والقياسات الموقعية لمعدلات الجرعات ورسم الخرائط لمواقع الخزن المؤقت للنفايات المشعة في محافظة فوكوشيما.

ويمكن للدول الأعضاء في الوكالة أن تستفيد، بناءً على طلبها، من التكنولوجيا والمنهجية وفرص التدريب ذات الصلة، وهناك بعض البلدان التي بدأ فيها التنفيذ بالفعل بدعم من الوكالة.

كيف تعمل هذه التكنولوجيا؟

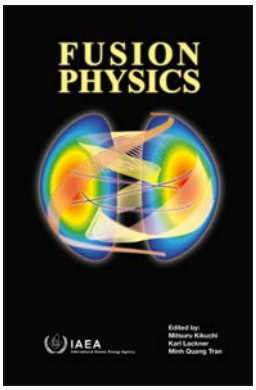
تُزوَّد نظمُ الطائرات بلا طيار بكواشف إشعاعية وكاميرات وأجهزة ملاحة قائمة على النظام العالمي لتحديد المواقع. وعقب إقلاع الطائرة بلا طيار، يجري الربط بين القراءات الإشعاعية وغيرها من المعلومات ذات الصلة بالتزامن مع موقع المركبة الدقيق بناءً على النظام العالمي لتحديد المواقع، وتُرسل هذه المعلومات آنيًّا إلى مُسيِّر الطائرة في المحطة الأرضية، مع تخزينها في الوقت ذاته داخل النظام الموجود على متن المركبة. وبعد هبوط الطائرة تُسترجع جميع البيانات المفصَّلة، ويُعادُ تشكيل المعلومات الفوتوغرافية والجغرافية إلى جانب القياسات الإشعاعية المصحَّحة. وبعد إنتاج صور تشبه الصور الملتقطة بالسواتل وخضوع القياسات الإشعاعية للتحليل، يُتاح كلاهما لمتَّخذي القرارات لتحديد الإجراءات الواجبة.

— بقلم ألكساندرا بيفا

الاندماج النووي

هي المجلة المعترف بريادتها على الصعيد العالمي بين المجلات المتخصصة في مجال الاندماج. وتتناول المجلة جميع الجوانب المتعلقة بالبحوث النظرية والعملية ذات الصلة بالاندماج النووي الحراري الخاضع للتحكُّم. وقد أُطلقت المجلة في عام ١٩٦٠، وهي تنشر الآن نحو ٤٠٠ مقال جديد سنويًّا، وتتيح منبراً محايداً للمساهمات العالية الجودة بهدف تقاسم المعارف في الأوساط البحثية المعنية بالاندماج. وتتولى الوكالة إدارة عملية استعراض النظراء وتنسِّق مع المؤلِّفين والمحكِّمين، ومع محرِّر المجلة الأكاديمي ومجلسها وناشرها المشارك، وهو دار النشر IOP (شركة النشر التابعة لمعهد الفيزياء). وفي السنوات الأخيرة، صار محتوى المجلة يجسِّد أيضاً التركيز المتزايد على المواد المستخدمة في آلات الاندماج. ويبلغ عدد مرات تنزيل نصوص كاملة من المجلة الإلكترونية نصف مليون مرة سنويًّا، وما انفكت المجلة تحقِّق أعلى مستوى من التأثير مقارنة بجميع المجلات المماثلة.

مجلة؛ doi:10.1088/issn.0029-5515؛ الرقم المعياري الدولي (ISSN) للنسخة المتاحة عبر الإنترنت: 1741-4326؛ الرقم المعياري الدولي (ISSN) للنسخة المطبوعة: 0029-5515



فيزياء الاندماج

هو مرجع شامل لطلاب الدراسات العليا ودليل بالغ القيمة للباحثين الأكثر خبرة. وهو بمثابة تقديم للاندماج النووي وحالته الراهنة وآفاقه، ويتضمَّن فصولاً متخصصة كتبها خبراء بارزون في المجال وتعرض أبرز مفاهيم البحث والتطوير في مجال فيزياء الاندماج. ويبدأ المنشور بمقدِّمة تتناول الحجج التي تدعو للأخذ بالاندماج كمصدر للطاقة، ويتناول كلًّا من الاحتواء المغناطيسي والاحتواء بالقصور الذاتي، ويتضمَّن فصولاً مكرَّسة تركِّز على فيزياء الاحتواء، والتوازن والاستقرار في مفاعلات التوكاماك، والتشخيص، والتسخين، ونظم دفع التيار الكهربائي باستخدام الحزم المحايدة والموجات ذات الترددات اللاسلكية، والتفاعلات بين البلازما والجدران. ومع أنَّ جهاز التوكاماك هو المفهوم التصميمي الرائد في سياق المساعي الرامية لتحقيق الاندماج، يتناول الكتاب أيضاً مفاهيم أخرى (مثل الاحتواء اللولبي، وبصورة أعم، أنساق أخرى للاحتواء المغناطيسي والاحتواء بالقصور الذاتي). وبذلك يقدِّم هذا الكتاب، في أكثر من ١١٠٠ صفحة، مورداً لا نظير له لعلماء الفيزياء والمهندسين العاملين في مجال الاندماج.

منشورات غير مسلسلة؛ الرقم الدولي المعياري للكتاب (ISBN): 978-92-0-130410-0؛ الطبعة الإنكليزية؛ ٩٠,٠٠ يورو؛ ٢٠١٢

اتباع نهج متكامل في تصنيف المكونات الميكانيكية المستخدمة في تطبيقات الاندماج من حيث الأمان

هو أول منشور تصدره الوكالة بشأن تصنيف المكونات الميكانيكية المستخدمة في تطبيقات الاندماج من حيث الأمان. ويُسلِّط المنشور الضوء على الاختلافات القائمة بين المفاعلات الانشطارية والاندماجية فيما يتعلق بتحديد وتصنيف الهياكل والنظم والمكونات المهمة للأمان ويقدِّم معلومات عملية عن تطبيقات الاندماج. ويقدِّم المنشور أيضاً معلومات حول مراعاة ظروف تمديد التصميم الجديدة التي أُضيفت بعد استعراض أدلة الأمان الصادرة عن الوكالة عقب حادث محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية.

وثيقة الوكالة التقنية TECDOC-1851؛ 978-92-0-105518-7؛ الطبعة الإنكليزية؛ ١٨,٠٠ يورو؛ ٢٠١٨

للحصول على معلومات إضافية، أو لطلب كتاب، يُرجى الاتصال على العنوان التالي:

Marketing and Sales Unit
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria

البريد الإلكتروني: sales.publications@iaea.org

ISSN 1819-1800 21-01120

اطَّلعوا على هذا العدد والأعداد الأخرى من مجلة الوكالة على الموقع
www.iaea.org/bulletin

للحصول على المزيد من المعلومات عن الوكالة وعملها، زوروا موقعنا الشبكي
www.iaea.org

أو تابعونا على

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية