ملف العدد

تطورالطاقة النووية واتجاهاتها في القارة الآسيوية

ا.د مجدى عبدالله
أستاذ متفرغ بهيئة الطاقة الذرية

الملخص:

يمكـن للطاقـة النوويـة أن تُسـاهم بشـكل كبـير فى تحقيـق أهـداف الطاقـة المسـتدامة وتعزيـز أمـن الطاقـة ، فهـى مصـدر طاقـة نظيـف خـالٍ مـن الانبعاثـات ويمكـن أن ينتـج طاقـة حمـل أساسـية بشـكل أكـثر مـن مصـادر الريـاح أو الطاقـة الشمسـية المتغـيرة ،وقـد بـدأت أول محطـة للطاقـة النوويـة فى العـالم العمـل فى مدينـة أوبنينسـك الروسـية عـام 1954 ، يوجـد حاليـاً 439 مفاعـلًا نوويًـا قيـد التشـغيل فى 32 دولـة تُنتـج حـوالى 10% مـن الكهربـاء العالميـة.

وأصبحـت آسـيا هـى المنطقـة الرئيسـية فى العـالم التـى تنمـو فيهـا قـدرة توليـد الكهربـاء، وخاصـة الطاقـة النوويـة بشـكل كبـير ، حيـث يوجـد فيهـا حـوالى 140 مفاعـل طاقـة نوويـة تحـت التشـغيل ، و37 قيـد الإنشـاء وخطـط ثابتـة لبنـاء 56 مفاعـلًا إضافيًـا ، وتشـترك الصـين والهنـد فى العديـد مـن الدوافـع المُشـتركة لتطويـر الطاقـة النوويـة ، حيـث تسـتهدف الصـين الوصـول إلى 70 جيجـاوات بحلـول عـام 2025 عـلى حـين تسـتهدف الهنـد 27.5 جيجـاوات بحلـول عـام 2030، ومـع تحـول الصـين نحـو تطويـر قطـاع الطاقـة المتجـددة والمسـتدامة، بـدأت منظمـة CFETR الصينيـة فى بنـاء أول مفاعـل تجريبـى لاختبـار هندسـة الاندمـاج الصينـى (EAST) ، وهـو مفاعـل توكامـاك إندماجـى يسـتخدم مجـالًا مغناطيسـيًا لحـصر البلازمـا وتوليد الطاقـة ، ومـن المرجـح أن يتـم الانتهـاء مـن نمـوذج أولى صناعـى بحلـول عـام 2035 ، ومـع تطبيـق تجـارى واسـع النطـاق بحلـول عـام 2050 .

Abstract:

Nuclear energy or atomic energy is the energy present in the nucleus or core of the atom. It is released in large quantities in processes that affect the nuclei of atoms. It can be used to generate electricity, but it must first be released from the atom as it can be obtained from nuclear fission, nuclear decay and fusion reactions (Nuclear Fusion).

Fusion is the process in which two light nuclei fuse together to create the nucleus of a heavier atom and release huge amounts of energy. Fission is the division of a heavy and unstable nucleus into two lighter nuclei, at present the vast majority of electricity is produced from nuclear energy through the nuclear fission of uranium and plutonium in nuclear power plants.

As China shifts towards developing a renewable and sustainable energy sector, China's CFETR organization has begun construction of China's first fusion engineering test (EAST) experimental reactor, a fusion tokamak reactor that uses a magnetic field to trap plasma and generate power. An industrial prototype is likely to be completed by 2035, with a large-scale commercial application by 2050.

As for nuclear power plants, they and their nuclear reactors and equipment contain and control chain nuclear fission reactions and are often fueled by uranium-235 or bottonium-239. The first nuclear power plant in the world began operating in the Russian city Obninsk in 1954. There are currently 439 nuclear reactors in operation in 32 countries, producing about 10% of global electricity.

Asia has become the main region in the world in which the capacity of generating electricity, especially nuclear energy, is growing significantly, as there are about 140 nuclear power reactors in operation,

37 under construction, and firm plans to build 56 additional reactors. China and India share many common drivers for developing nuclear energy, as China aims to reach 70 giga watts by 2025, while India targets 27.5 giga watts by 2030.

Together with renewable, energy efficiency and other innovative technologies, nuclear energy can make a significant contribution to achieving sustainable energy goals and enhancing energy security. It is a clean, zero-emissions energy source that can produce base load power more reliably than wind or variable solar sources.

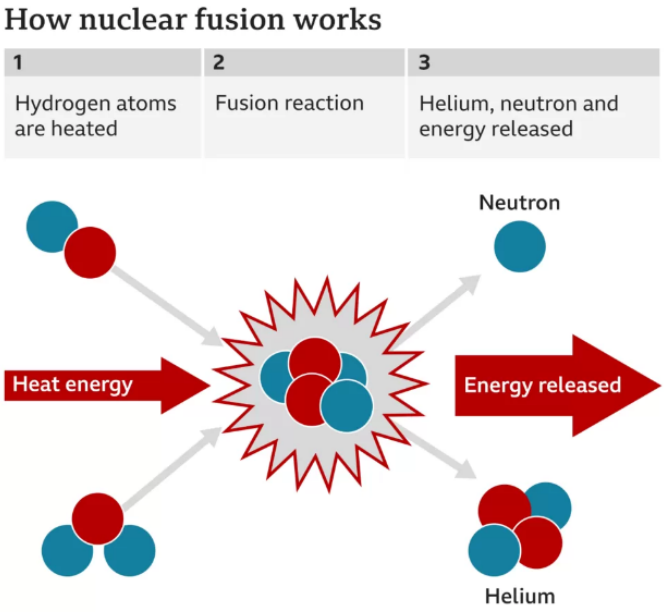
مقدمة

تعتبر الطاقة النووية **أو**الطاقة الذرية هى الطاقة الموجودة فى نواة أو جوهر الذرة ، ويتم إطلاقها بكميات كبيرة فى العمليات التي تؤثر على أنوية الذرات ، والذرة عبارة عن وحدة صغيرة تُشكل كل المواد فى الكون ، والطاقة هى ما يربط الأنوية معاً حيث توجد كمية هائلة من الطاقة فى نواة الذرة ،وهى تختلف عن طاقة الظواهر الذرية الأخرى مثل التفاعلات الكيميائية العادية ،والتى تتضمن فقط الإلكترونات المدارية للذرات ، ويمكن استخدام الطاقة النووية لتوليد الكهرباء ولكن يجب أولاً إطلاقها من الذرة ، حيث يُمكن الحصول عليها من الإنشطار النووى (Nuclear Fission) والإنحلال النووى وتفاعلات الإندماج (Nuclear Fusion) ، والإنشطار والإندماج عبارة عن تفاعلات نووية تُنتج الطاقة ولكن العمليات مُختلفة تمامًا ، فالانشطار هو انقسام نواة ثقيلة وغير مستقرة إلى نواتين أخف ، أما الاندماج فهو العملية التي تتحد فيها نواتان خفيفتان معًا لتنتج نواة ذرة أثقل وتطلق كميات هائلة من الطاقة ، وفى الوقت الحاضر يتم إنتاج الغالبية العظمى من الكهرباء من الطاقة النووية عن طريق الانشطار النووى لليورانيوم والبلوتونيوم فى محطات الطاقة النووية ، وتُستخدم عمليات التحلل النووى فى تطبيقات مُتخصصة مثل المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة فى بعض المجسات الفضائية مثل فوييجر ٢ ، أما توليد الكهرباء من قوة الإندماج لا يزال محور البحث الدولى .

الإندماج النووى:

الإندماج النووى هو العملية التي تتحد من خلالها نواتان خفيفتان لتشكيل نواة واحدة أثقل ، وتُطلق كمية كبيرة من الطاقة ، حيث يتم الجمع بين ذرتين من الهيدروجين الخفيف وهما الديوتيريم وعدده الذرى ٢ وتتكون نواته من برتون + نيترون ، والتريتيوم وعدده الذرى ٣ وتتكون نواته من بروتون + ٢ نيترون ، لتكوين ذرة أثقل من الهيليوم (٢ بروتون + ٢ نيترون) ويطلق كمية كبيرة من الطاقة خلال هذه العملية (شكل ١) وهى التى تحدث أيضاً داخل النجوم بما فيها الشمس .

شكل (١) يوضح تفاعلات الإندماج النووى



ويُمكن إثارة تفاعلات الاندماج على الأرض عن طريق تسخين الهيدروجين إلى درجات حرارة قصوى داخل أجهزة مُخصصة لذلك ، ولتحويل الاندماج إلى مصدر طاقة فهناك الحاجة إلى مزيد من الطاقة على نحو أكبر ، والحاجة أيضا إلى إيجاد طريقة لإعادة إنتاج التأثير نفسه على نحو متكرر وبتكلفة أقل بكثير قبل التمكن من تحويل هذا إلى محطة لإنتاج الطاقة ، وقد تم

استغلال إمكانات الطاقة الهائلة للاندماج النووي لأول مرة فى الأسلحة النووية الحرارية والقنابل الهيدروجينية والتى تم تطويرها في أعقاب الحرب العالمية الثانية ، وعلى الرغم من أن مفاعلات الاندماج العملية لم يتم بناؤها بعد ، فقد تم تحقيق الشروط اللازمة لدرجة حرارة البلازما والعزل الحرارى إلى حد كبير ، مما يشير إلى أن طاقة الاندماج لإنتاج الطاقة الكهربائية أصبحت الآن احتمالًا قريباً ، وتُعد مفاعلات الاندماج التجارية مصدر لا ينضب للكهرباء للبلدان فى جميع أنحاء العالم ، والاندماج النووى هو أنظف مصادر الطاقة المتاحة لأنه يكرر فيزياء الشمس عن طريق دمج النوى الذرية لتوليد كميات كبيرة من الطاقة فى الكهرباء ولا تتطلب العملية أى وقود أحفورى فهى خالية من الكربون أثناء التشغيل ولا تترك وراءها أى نفايات مُشعة ، وهى بديل أكثر أمانًا للطاقة النووية الانشطارية فهى لا تُشكل خطر حدوث كارثة نووية ، ولكن الطريق ما زال طويلاً قبل أن يُصبح الاندماج قابلا للتطبيق على نطاق صناعى .

ويهدف الاندماج إلى تكرار العملية التى تحدث فى النجوم حيث تندمج الحرارة الشديدة فى النواة معًا وتنتج كميات هائلة من الطاقة على شكل حرارة وضوء ، وتسخير قوة الاندماج فى الظروف الأرضية من شأنه أن يوفر طاقة كافية لتلبية الطلب المتزايد ، وللقيام بذلك بطريقة مستدامة يكون لها تأثير ضئيل نسبيًا على البيئة حيث ينتج جرام واحد من خليط وقود الديوتيريوم والتريتيوم فى عملية الإندماج النووى ٩٠ ألف كيلووات / ساعة من الطاقة ، أو ما يعادل ١١ طنًا من الفحم .

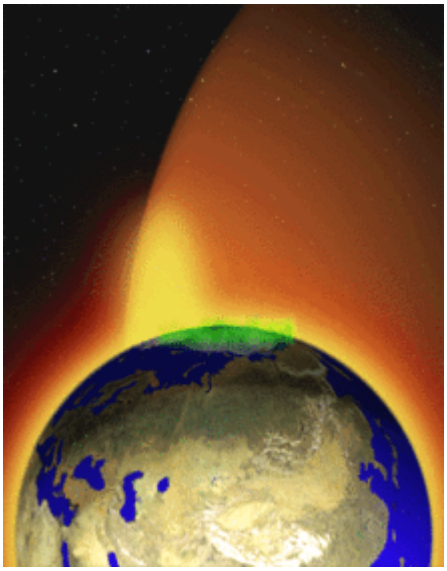
ويحاول العلماء الاستفادة من قوة الاندماج النووى وهى العملية التي تحترق بها النجوم من خلال دمج ذرات الهيدروجين لتكوين الهليوم تحت ضغوط ودرجات حرارة عالية جداً ، ويُمكن لما يُسمى بالنجوم الرئيسية المتتالية تحويل المادة إلى ضوء وحرارة ، وتوليد كميات هائلة من الطاقة دون إنتاج غازات الدفيئة أو نفايات مشعة طويلة الأمد ، لكن تكرار الظروف الموجودة داخل قلوب النجوم ليس بالمهمة السهلة ، والتصميم الأكثر شيوعًا لمفاعلات الاندماج هو التوكاماك حيث يعمل عن طريق التسخين الفائق

للبلازما ، والبلازما هى إحدى حالات المادة الأربع وتتكون من أيونات موجبة وإلكترونات حرة سالبة الشحنة قبل حصرها داخل حجرة مفاعل على شكل كعكة دائرية ذات مجالات مغناطيسية قوية ، ومع ذلك فإن الحفاظ على ملفات البلازما المُضطربة والسخونة الفائقة فى مكانها لفترة كافية لحدوث الاندماج النووى كانت عملية شاقة ، حيث صمم العالم السوفيتي ناتان يافلينسكي أول توكاماك فى العالم عام ١٩٥٨ ، لكن لم ينجح أحد على الإطلاق في إنشاء مفاعل تجريبى قادر على إخراج طاقة أكثر مما يستهلك .

اما البلازما هى حالة مُتميزة من حالات المادة يمكن وصفها بأنها غاز مُتأين تكون فيه الإلكترونات حرة وغير مُرتبطة بالذرة أو بالجزىء ، فإذا كانت المادة توجد فى الطبيعة فى ثلاث حالات صلبة وسائلة وغازية ، فإنه بالإمكان تصنيف البلازما على أنها الحالة الرابعة التى يُمكن أن توجد عليها المادة ، وليس للبلازما شكل أو حجم مُحدد ، فهى تأخذ شكل غاز مُحايد (مُعتدل) شبيه بالغيوم وقد تتأثر بالمجال المغناطيسي فتكون لها بنية عبارة عن خيوط أو حزم أو طبقة مزدوجة ، وقد تحتوي على غُبار وحبيبات (وتُسمى البلازما المُغبرة) ، وتقاس حرارة البلازما بالكالفن أو إلكترون فولت ، وهى قياس للطاقة الحركية الحرارية لكل جزىء ، وتُشكل البلازما نسبة ٩٩٪ من المادة الكونية بين النجوم والمجرات من حيث الكتلة والحجم، وبعض الكواكب تُشكل البلازما أغلب مادتها ، حيث يُعتبر كوكب المُشترى كتلة هائلة من البلازما .

والأرض منبع البلازما حيث نجد أن أيونات الأكسجين والهيدروجين والهليوم تتدفق إلى الفضاء من مناطق قريبة من القُطبين ، واللون الأصفر الواقع فوق القطب الشمالى يرمُز إلى ضياع الغازات إلى الفضاء الخارجى والمنطقة الخضراء ترمُز إلى شفق القطب الشمالى أو طاقة البلازما المتدفقة عائدة إلى الأرض (شكل ٢) ، ويُعتبر البرق مثالاً للبلازما الموجودة على سطح الأرض ، وتفريغ البرق للكهرباء يكون عادة بمقياس ٣٠,٠٠٠ أمبير ويصل إلى ١٠٠ مليون فولت ، حيث يصدُر منها الضوء والموجات الراديوية والأشعة السينية وحتى أشعة جاما ، وقد تصل درجة حرارة البلازما بالبرق إلى حوالى ٢٨,٠٠٠ كالفن (حوالى ٢٧,٧٠٠ درجة مئوية) وقد تتعدى كثافة الإلكترون ٢٤١٠/متر^3 (شكل 3) .

شكل (٢) يوضح الأرض منبع البلازما



شكل (٣) يوضح البرق مثال للبلازما على سطح الأرض

الإنجاز الأمريكى فى مجال الإندماج النووى:

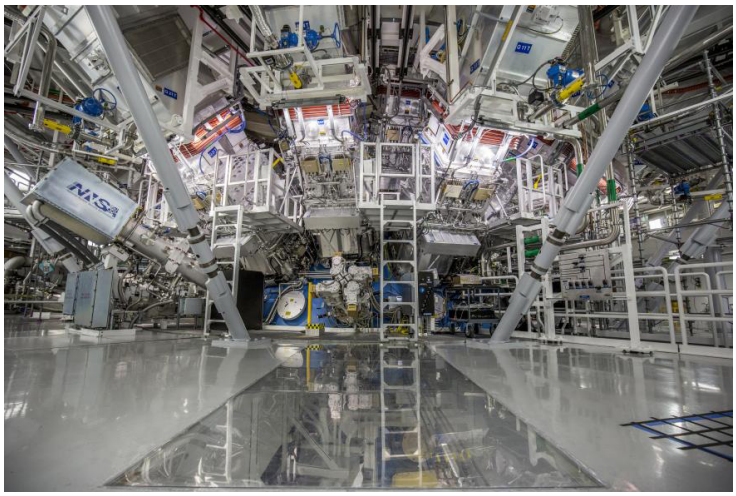
مؤخراً أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية (DOE) والإدارة الوطنية للأمن النووى التابعة لوزارة الطاقة (NNSA) عن تحقيق الإشعال الاندماجي فى مُختبر لورانس ليفرمور الوطنى (LLNL) وهو «اختراق علمى كبير» فى مجال الإندماج النووى فى تطور وصف بأنه «إنجاز تاريخى» من شأنه أن يُمهد الطريق للتقدم فى الدفاع الوطني ومستقبل الطاقة النظيفة ، فقد عمل فريق فى مرفق الأشغال الوطنى (NIF) أول تجربة اندماج متحكم فيها فى التاريخ للوصول إلى هذا الإنجاز (شكل ٤) المعروف أيضًا باسم التعادل العلمى للطاقة ، مما يعني أنه يُنتج طاقة من الاندماج أكثر من طاقة الليزر المُستخدمة لقيادتها وسيوفر هذا الإنجاز الأول من نوعه قدرة غير مسبوقة لدعم برنامج الإشراف على المخزونات NNSA وسيوفر رؤى لا تُقدر بثمن حول آفاق طاقة الاندماج النظيف .

وقد استخدم الباحثون فى مُختبر لورانس ليفرمور الوطني فى "منشأة الإشعال الوطنية الأمريكية الضخمة (NIF) بولاية كاليفورنيا (وهى أكبر منشآت أبحاث

الليـزر التابعـة لـوزارة الطاقـة الأمريكيـة بتكلفـة قُـدرت بحـوالى ٣,٥ مليـار دولار أمريـكى) ١٩٢ جهـاز ليزراً فائـق القـوة موجهـة جميعهـا إلى أسـطوانة صغـيرة مملـوءة بالهيدروجـين ، حيـث أنتجـت التجربـة حـوالى ٢,٥ ميجـا جـول مـن الطاقـة فى تفاعـل اندمـاج نـووى ، أو نحـو ١٢٠٪ مـن ٢,١ ميجـا جـول اسـتخدمها الليـزر لبـدء التفاعـل .

شكل رقم (٤)

يوضح الغرفة المستهدفة في مرفق الإشعال الوطني حيث قدمت ١٩٢ حزمة ليزر أكثر من مليوني جول من الطاقة فوق البنفسجية إلى حبيبات وقود صغيرة لإنشاء اشتعال اندماجي

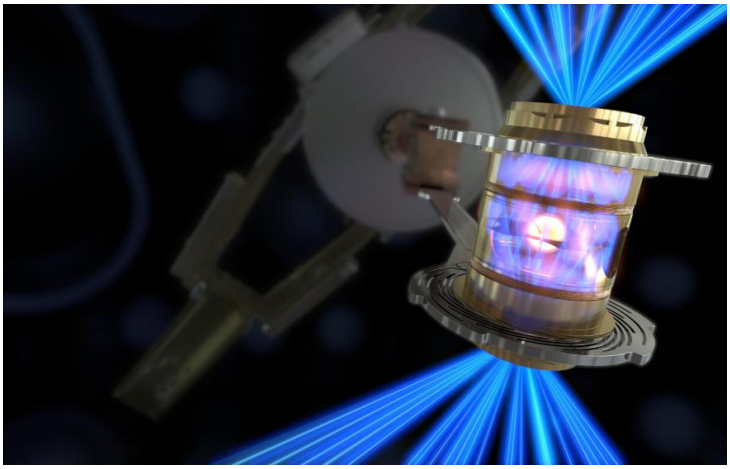


وفى تصريـح لمـارك هيرمـان مديـر البرامـج فى لورانـس ليفرمـور لقـد حصلنـا عـلى ٣,١٥ ميجـا جـول ، ووضعنـا ٢,٠٥ ميجـا جـول في الليـزر حيـث انـه لم يتـم القيـام بذلـك مـن قبـل فى أى مختـبر اندمـاج فى أى مـكان فى العـالم لـذا فهـو مثـير للغايـة ، واسـتغرق الأمـر حـوالى ٣٠٠ ميجـا جـول مـن الطاقـة مـن شـبكة الكهربـاء لإطـلاق الليـزر المُسـتخدم فى التجربـة ، وهـذا يعـادل مـا يتـم تضمينـه في حـوالى جالونـين ونصـف مـن البنزيـن ، وذهبـت كل هـذه الطاقـة إلى تفاعـل الاندمـاج بالليـزر الـذى أظهـر مكاسـب صافيـة تبلـغ حـوالي ١,١ ميجـا جـول ، وهـى طاقـة كافيـة لغـلى غلايـة الشـاى ربمـا مرتـين أو ثـلاث مـرات (شـكل ٥) ، وهـذا يثبـت أن الاندمـاج يُمكن أن ينجـح ويفتـح البـاب عـلى مصراعيـه لمزيـد مـن الاهتـمام والاسـتثمار والابتـكار

نحو تحويل الاندماج إلى مصدر طاقة ، ولعمل ذلك فهناك الحاجة إلى مزيد من الطاقة على نحو أكبر ، والحاجة أيضا إلى إيجاد طريقة لإعادة إنتاج التأثير نفسه على نحو مُتكرر وبتكلفة أقل بكثير قبل التمكن من تحويل هذا إلى محطة لإنتاج الطاقة ، التى لن تساهم بالكهرباء فى أى شبكة كهرباء قبل عقد من الزمان على الأقل وفقًا لمعظم مراقبى الصناعة .

شكل رقم (٥)

يوضح لإنشاء الاشتعال الاندماجى ، يتم تحويل طاقة الليزر فى مرفق الإشعال الوطنى إلى أشعة سينية ، والتي تضغط بعد ذلك على كبسولة الوقود حتى تنفجر ، مما ينتج عنه بلازما عالية الضغط وعالية الحرارة



وفى تقرير لدورية Nature أستعرض تمكُن فريق من العلماء العاملين فى المنشأة من توليد أكثر من ١٠ ملايين جيجا وات من طاقة الإندماج لمُدةٍ بلغت جزءًا من الثانية ، أى ما يزيد بحوالى ٧٠٠ مرة عن السعة الإنتاجية لشبكة الكهرباء الأمريكية بأكملها فى أى لحظة ، وكانت المنشأة مُصمَّمةً بالأساس لدراسة تفاعلات الاندماج التى تقوم عليها الأسلحة النووية الحرارية ، فبعد أن حظرت الولايات المتحدة الاختبارات النووية تحت الأرض فى أعقاب الحرب الباردة عام ١٩٩٢ ، اقترحت وزارة الطاقة تأسيس هذه المنشأة ضمن برنامج علمى أكبر وهو الإشراف على المخزون النووى ؛ وهو برنامجٌ مُصمَّم للتحقق من إمكانية الاعتماد على الأسلحة النووية الأمريكية دون الإضطرار لتفجير أى

منها ، مما يُساعد على الوصول إلى فهمٍ أفضل لكيفية بدء الاندماج النووى ومن ثم تفجير الأسلحة النووية .

وتصل مساحة المُنشأة إلى ثلاثة ملاعب كرة قدم أمريكية ، وتضمُّ مصفوفةً من العدسات والمرايا تعمل على تضخيم دفقة أولية من الفوتونات ، ثم تقسيمها لتحولها إلى ١٩٢ حزمة من أشعة الليزر فوق البنفسجية ، ثم تُسلط تلك الأشعة بعد تركيزها مرةً أخرى على هدفٍ أصغر من أستيكة القلم الرُصاص لتضرب أسطوانةٍ ذهبية تحوي كُريَّة مُجمَّدة مضغوطة من الديوتيريوم والتريتيوم ، لتصبَّ عليها طاقة يبلغ حجمها حوالى ١,٩ ميجا جول، خلال فترة تقل عن أربعة أجزاء من مليار جزء من الثانية مولدةً بذلك مستوياتٍ من الضغط والحرارة لا نشهد لها مثيلًا إلا فى النجوم وانفجارات القنابل النووية الحرارية ، ويترتب على ذلك انهيار الأسطوانة وترتفع درجة حرارة نظائر الهيدروجين الموجودة فى قلب الكُريَّة وتندمج مولدةً نويَّات هيليوم ونيوترونات وأشعة كهرومغناطيسية ، والهدف من هذه العملية هو إطلاق كميةٍ كبيرة من الجُسيمات ، ينجُم عنها حدوث مزيدٍ من تفاعلات الاندماج ، ومن ثم إطلاق مزيدٍ من الجسيمات وهكذا ينشأ تفاعل إندماج مُستدام ، ويكون الاندماج خالياً من الكربون أثناء التشغيل ، ولا يطرح خطر حدوث كارثة نووية وينتج نفايات مشعة أقل بكثير من الانصهار ، وقد أكد الباحثون أنهم تغلبوا على حاجز رئيسى وهو إنتاج طاقة من تجربة الإندماج أكثر مما تم وضعه فيها ، لكن الخبراء يقولون إنه لا يزال هناك طريق طويل لنقطعه قبل أن يتم تزويد المنازل بالطاقة الإندماجية .

المفاعل النووى الحرارى التجريبي الدولي إيتر (ITER)

يجرى حالياً تطوير مشاريع أخرى للاندماج النووى فى مُختلف أنحاء العالم ، بما فى ذلك المشروع الدولي الكبير المعروف باسم (ITER) ، وهو قيد الإنشاء في سان بول ليس دورانس – فرنسا ، وسيستخدم ITER بدلاً من الليزر تكنولوجيا تُعرف باسم «الحصر المغناطيسي» تحتوى على كتلة دوامة من بلازما الهيدروجين الاندماجية داخل حجرة ضخمة على شكل كعكة دائرية ، وكانت عملية اختيار موقع ITER طويلة حيث اقترحت اليابان موقعًا فى

روكاشو بجانب موقعين فى أوروبا وهما موقع Cadarache فى فرنسا وموقع Vanadellos فى إسبانيا ، بالإضافة إلى موقع Clarington فى كندا لينتهى المطاف على اختيار موقع فرنسا (شكل ٦) .

شكل (٦)

يوضح موقع Cadarache في فرنسا

ويعتبر مشروع ITER أغلى تجربة علمية على الإطلاق ، ويتم تمويله وإدارته من قبل مجموعة من الأطراف الأعضاء وهم الصين والاتحاد الأوروبى والهند واليابان وروسيا وكوريا الجنوبية وأمريكا بالإضافة إلى المملكة المتحدة وسويسرا ، وللمشروع اتفاقيات تعاون مع أستراليا وكندا وكازاخستان وتايلاند بتكلفة إجمالية وميزانية تقديرية ١٠٠ مليار يورو أو ١٥٠ مليار دولار ، وهو المشروع الهندسي الأكثر تعقيدًا فى تاريخ البشرية ، وواحداً من أكثر أشكال التعاون البشرى طموحًا مُنذ تطوير محطة الفضاء الدولية ، وهو مشروع بحثى وهندسى دولى فى مجال الإندماج النووى يهدف إلى توليد الطاقة عن طريق التكرار على الأرض (عمليات اندماج الشمس) ، وعند الإنتهاء من بناء المفاعل الرئيسى وأول بلازما ستكون أكبر تجربة فيزياء بلازما الحبس المغناطيسى فى

العالم ، حيث يحتوى على أقوى مجال مغناطيسى فى العالم تبلغ قوته ٢٨٠ ألف ضعف قوة المجال المغناطيسى الأرضى ، وأكبر مفاعل اندماج نووى تجريبى توكاماك يجري بناؤه بجانب Cadarache فى جنوب فرنسا ، وسيكون ITER الأكبر من بين أكثر من ١٠٠ مفاعل اندماج تم بناؤها ، بعشرة أضعاف حجم البلازما لأى توكاماك آخر يعمل اليوم ، وقد تم البدأ فى بناء مجمع ITER عام ٢٠١٣ كما بدأ تجميع مفاعل توكاماك فى عام ٢٠٢٠ (شكل ٧) .

شكل (٧)

يوضح منظر جوي لموقع ITER فى عام ٢٠٢٠

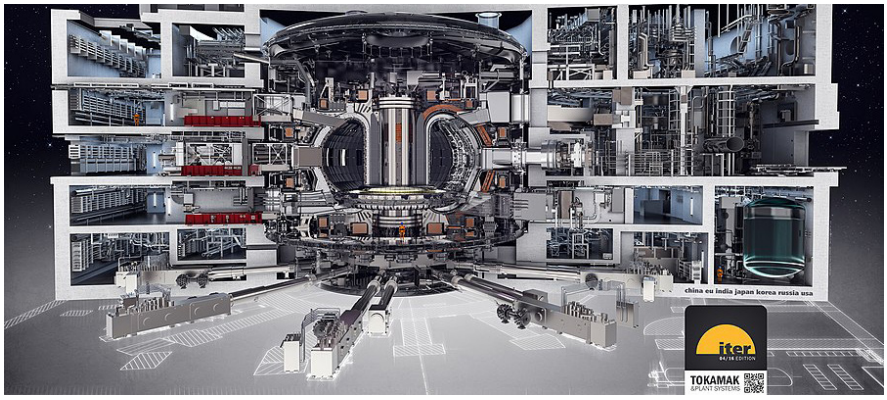
وتتمثل أهداف ITER في تحقيق اندماج كافٍ لإنتاج طاقة خرج حرارية تعادل ١٠ أضعاف الطاقة الحرارية التى تمتصها البلازما لفترات زمنية قصيرة ، وأيضاً لإثبات واختبار التقنيات اللازمة لتشغيل محطة توليد الطاقة الاندماجية بما فى ذلك أنظمة التبريد والتدفئة والتحكم والتشخيص والصيانة عن بُعد ؛ لتحقيق البلازما المحترقة والتعلم منها ، وسيستخدم مفاعل الإندماج النووي الحرارى التابع لـ ITER أكثر من ٣٠٠ ميجاوات من الطاقة الكهربائية لجعل البلازما تمتص ٥٠ ميجاوات من الطاقة الحرارية ، مما يخلق ٥٠٠ ميجاوات من الحرارة من الاندماج لفترات من ٤٠٠ إلى ٦٠٠ ثانية ، ويعنى هذا زيادة بمقدار عشرة أضعاف فى طاقة تسخين البلازما .

وسيستخدم ITER مزيجًا من الديوتيريوم والتريتيوم من أجل اندماجها بسبب إمكانات الطاقة العالية للمجموعة ، كما أن تفاعل الإندماج هذا هو

الأسهل في التنفيذ حيث يُمكن استخلاص النظير الأول الديوتيريوم من مياه البحر مما يعني أنه مورد لا ينضب تقريبًا ، والنظير الثانى التريتيوم يحدث فقط بكميات ضئيلة في الطبيعة والإمداد العالمى المقدر هو ٢٠ كيلوجرامًا فقط فى السنة وهى غير كافية لمحطات الطاقة ، ويوضح شكل رقم (٦) رسم توكاماك ITER وأنظمة المصنع المتكاملة وسيختبر ITER تقنية شاملة لتكاثر التريتيوم والتى من شأنها أن تسمح لمفاعل الاندماج فى المستقبل بتكوين التريتيوم الخاص به وبالتالي يكون مكتفيًا ذاتيًا ، علاوة على ذلك لن ينتج مفاعل الاندماج فعليًا أى انبعاثات لثانى أكسيد الكربون أو ملوثات جوية ، ولن تكون هناك فرصة للإنصهار وستكون نفاياته المشعة قصيرة العمر فى الغالب مقارنة بتلك التي تنتجها مفاعلات الانشطار ، ومن المتوقع أن يكون اختبار أول بلازما فى عام ٢٠٢٥ واندماج كامل فى عام ٢٠٣٥.

شكل (٨)

يوضح رسم توكاماك ITER وأنظمة المصنع المتكاملة



الشمس الاصطناعية فى الصين:

مع تحول الصين نحو تطوير قطاع الطاقة المتجددة والمستدامة ، بدأت منظمة CFETR فى بناء أول مفاعل تجريبى لاختبار هندسة الاندماج (EAST) وهو مفاعل توكاماك الاندماجى ، والذي يستخدم مجالًا مغناطيسيًا لحصر البلازما وتوليد الطاقة في الوقت الحاضر ، ومن المرجح أن يتم الانتهاء من نموذج أولى صناعى بحلول عام ٢٠٣٥ ، ومع تطبيق تجارى واسع النطاق

بحلول عام ٢٠٥٠ ، وهو أول مفاعل توكاماك يستخدم مغناطيسات حلقية فائقة التوصيل بهدف الحصول على نبضات بلازما تصل إلى ١٠٠٠ ثانية ، ونظرًا لأن الصين عضو في مشروع ITER الدولى فمن المأمول أن يوفر EAST قوة دفع جديدة لمزيد من التطوير (شكل ٩) .

شكل (٩)

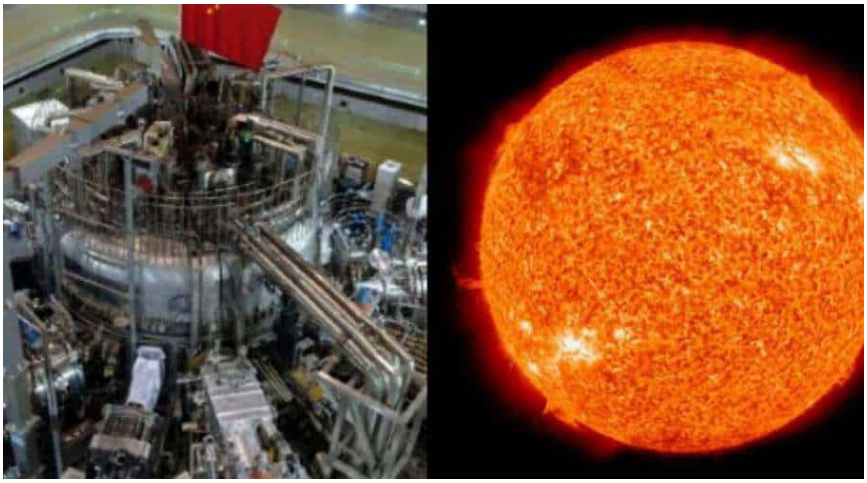
يوضح المفاعل التوكاماك التجريبي المتقدم فائق التوصيل

وفى مايو ٢٠٢١ وصلت EAST إلى درجة حرارة ١٢٠ مليون درجة مئوية للإلكترون لمدة ١٠١ ثانية ، بينما فى ديسمبر ٢٠٢١ تم تحقيق عملية بلازما طويلة النبضة عالية المعلمة مدتها ١٠٥٦ ثانية مما أدى مرة أخرى إلى إنشاء رقم قياسى عالمى جديد لتشغيل جهاز توكاماك التجريبى ، وفى تجربة أخرى حققت «الشمس الاصطناعية» أيضًا درجة حرارة ١٦٠ مليون درجة مئوية لمدة ٢٠ ثانية ، ويُعتقد على نطاق واسع أن درجة الحرارة فى قلب الشمس تبلغ ١٥ مليون درجة مئوية مما يعنى أن البلازما فى قلب الجهاز ستكون أكثر حرارة من الشمس بعشر مرات (شكل ١٠) ، ومع ذلك ونظرًا لأن التكنولوجيا لا تزال فى المرحلة التجريبية ، فإنها لا تزال بحاجة إلى ٣٠ عامًا على الأقل حتى تخرج

التكنولوجيا من المختبر، إنها أشبه بتكنولوجيا مستقبلية حاسمة لدفع التنمية الخضراء فى الصين ، وفى حين أن الرقم القياسي الجديد للشمس الاصطناعية رائع إلا أنه لا يزال بعيدًا جدًا عن تفاعل البلازما الذاتى أو الاشتعال ، وسيشمل ذلك درجات حرارة أعلى من المحتمل على أن يتم الاحتفاظ بها لفترة أطول بكثير

شكل (١٠)

التوكاماك التجريبي المتقدم فائق التوصيل (EAST) ، وصورة ممثلة "للشمس الاصطناعية



وحاليًا يتم استخدام مفاعل EAST الصينى لاختبار التكنولوجيا لمفاعل توكاماك الأكبر الذى قيد الإنشاء فى فرنسا ، وتهدف الصين إلى استكمال وبدء توليد الطاقة من مفاعل اندماج نووى تجريبى بحلول عام ٢٠٤٠ تقريبا ، فى الوقت الذي تعمل فيه على تطوير وتسويق مصدر للطاقة النظيفة ، كما أنها مسؤولة عن تصنيع ٩٪ من مكونات ITER ، وتلعب دورًا رئيسيًا في التقنيات الأساسية مثل الاحتواء المغناطيسى ، فضلاً عن إنتاج المكونات التى يُمكنها تحمل درجات حرارة تزيد عن ١٠٠ مليون درجة مئوية .

دور الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA):

أطلقت الوكالة الدولية للطاقة الذرية مجلة الاندماج النووى لتبادل المعلومات حول التطورات في الاندماج النووى ، وتنشُر بانتظام جداول بيانات التعاون التقنى ومواد التوعية والتثقيف حول الاندماج ، وتعقد الوكالة مؤتمرًا

كل عامين لتعزيز النقاش حول التطورات والإنجازات فى هذا المجال ، كما أُنشىء المجلس الدولى لبحوث الإندماج التابع للوكالة كمُحفز لإقامة تعاون دولى مُحسن فى أبحاث الاندماج ، وأصبح هناك تعاون بين الوكالة ومنظمة إيتر من خلال اتفاقية تعاون تم توسيعها وتعميقها فى ٢٠١٩ ، وتسهل الوكالة التعاون والتنسيق الدوليين بشأن أنشطة البرنامج التجريبى في جميع أنحاء العالم .

كما تنفذ الوكالة سلسلة من الاجتماعات الفنية وأنشطة البحث المُنسقة بشأن الموضوعات ذات الصلة بتطوير ونشر علوم وتكنولوجيا الاندماج ، وتُنظم وتدعم أنشطة التعليم والتدريب بشأن الاندماج، وتحتفظ بقواعد بيانات رقمية للبيانات الأساسية لبحوث طاقة الاندماج ، وكذلك نظام معازمات جهاز الاندماج (FusDIS) ، الذي يجمع معلومات عن أجهزة الاندماج العاملة أو قيد الإنشاء أو التى يجرى التخطيط لها فى جميع أنحاء العالم ، وتنفذ الوكالة مشروعًا بشأن أوجه التآزر فى تطوير التكنولوجيا بين الانشطار النووى والاندماج لإنتاج الطاقة ، والاستدامة طويلة الأجل بما فى ذلك مُعالجة النفايات المشعة والمسائل القانونية والمؤسسية لمرافق الاندماج ، وتحقق الوكالة فى جوانب الأمان الرئيسية التى تُغطي دورة الحياة الكاملة لمُنشآت الاندماج ، حيث تكون هناك حاجة إلى مبادئ توجيهية ووثائق مرجعية محددة .

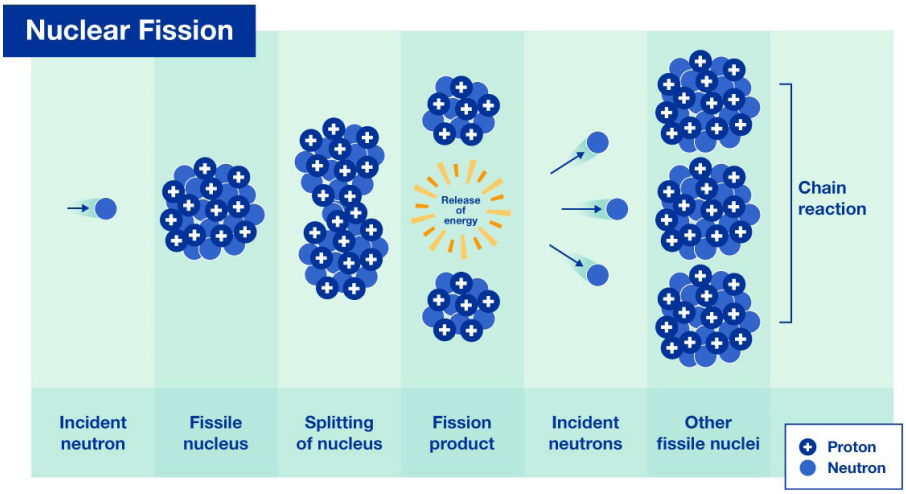
واعتبارًا من نوفمبر ٢٠٢٠ بدأت الوكالة العمل مع دول مختلفة لوضع معايير أمان لمفاعل الاندماج لمختلف تصاميم مفاعلات الاندماج ، علاوة على ذلك فقد تم البدء فى التحقيق فى لوائح الجرعة المناسبة وكذلك كيفية إدارة النفايات المُشعة من طاقة الاندماج والتخلص منها بشكل مناسب .

الإنشطار النووى (Nuclear Fission)

الإنشطار النووى هو عملية انقسام نواة ذرة ثقيلة إلى قسمين أو أكثر ، وبهذه العملية يتحول عنصر معين إلى عنصر أخر وينتج عن عملية الانشطار نيوترونات وفوتونات عالية الطاقة خاصة أشعة جاما وجسيمات ألفا وبيتا ويؤدى ،انشطار العناصر الثقيلة إلى تولد كميات ضخمة من الطاقة الحرارية والإشعاعية (شكل ١١) .

شكل (١١)

يوضح عملية الانشطار النووى، المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية



وتستخدم عملية الانشطار النووى فى إنتاج الطاقة الكهربائية فى المفاعلات النووية ، كما تستعمل لإنتاج الأسلحة النووية ، ومن العناصر النووية الانشطارية الهامة التي تُستخدم كثيراً فى المفاعلات الذرية كوقود نووى مادتي اليورانيوم-٢٣٥ والبلوتونيوم-٢٣٩ ، وفى الوقود النووى يتم ما يُسمى بالتفاعل المُتسلسل حيث يصطدم نيوترونـاً مع نواة ذرة اليورانيوم-٢٣٥ فتنقسم إلى قسمين ؛ ويصاحب هذا الانقسام انطلاق عدد من النيوترونات يُقدر عادة من ٢-٣ نيوترونات وفى المتوسط ٢,٥ نيوترون ، ويُمكن لتلك النيوترونات الناتجة أن تصطدم بأنوية أخرى من اليورانيوم-٢٣٥ وتتفاعل معها وتعمل على انشطارها ، بذلك يزيد معدل التفاعل زيادة تسلسلية قد يؤدى إلى الانفجار إذا لم ننجح فى ترويضه والتحكم فيه .

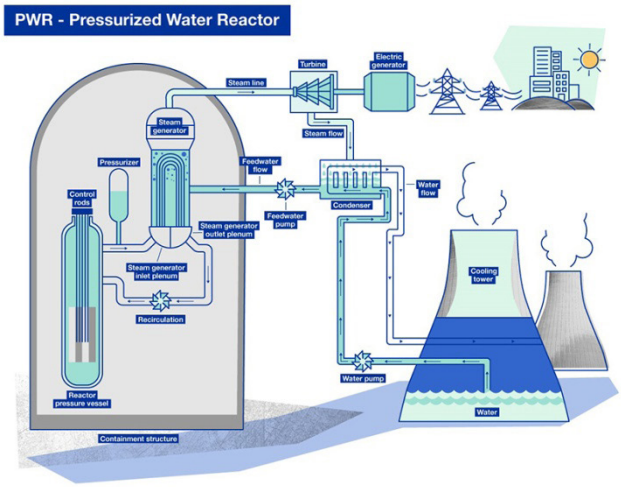
كيفية عمل محطة الطاقة النووية

داخل محطات الطاقة النووية ، تحتوى المفاعلات النووية ومُعداتها على التفاعلات المتسلسلة وتتحكم فيها ، وغالبًا ما يغذيها اليورانيوم ٢٣٥ ، لإنتاج الحرارة من خلال الانشطار وينتج عن كل انشطار لنواة يورانيوم واحدة قدر

هائل من الطاقة يبلُغ نحو ٢٠٠ مليون الكترون فولت تظهر فى صورة حرارة وإشعاع ، وتقوم الحرارة بتسخين عامل تبريد المفاعل ، وعادة هو الماء لإنتاج البخار ، ثم يتم توجيه البخار إلى التوربينات الدوارة ، لتنشيط مولد كهربائي لتوليد كهرباء منخفضة الكربون.

شكل (١٣)

يوضح مفاعلات الماء المضغوط وهى الأكثر استخدامًا فى العالم (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)



وفى المفاعلات النووية التى تُستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية يُستعمل اليورانيوم-٢٣٥ أو البلوتونيوم-٢٣٩ بنسبة ٥,٣ ٪ فى مخلوط أكسيد اليورانيوم لإنتاج الطاقة ، ويحتاج مفاعل نووى كبير يعمل بقدرة ١٠٠٠ ميجاوات إلى نحو ١٠٠ طن من أكسيد اليورانيوم تكفيه لمدة ثلاث سنوات ، ويتم إيقاف تشغيل المفاعل كل سنة لمدة عدة أسابيع يجري خلالها استبدال ثُلث كمية الوقود النووى المستهلك بوقود جديد ، وكذلك لإجراء أعمال الصيانة والتفتيش عن أى خلل قد يحدث ومعالجة ذلك الخلل .

تاريخ توليد الطاقة النووية

فى عـام ١٩٥٤ تـم صُنـع التاريـخ عندمـا تمـت الموافقـة عـلى تقنيـة الانشـطار النـووى لأغـراض تجاريـة وبـدأت أول محطـة للطاقـة النوويـة فى العمـل فى مدينـة أوبنينسـك الروسـية ، حيـث أثبتـت الطاقـة الجديـدة أنهـا شـكل موثـوق للغايـة ومسـتقر للكهربـاء ، نظـرًا لأن محطـات الطاقـة النوويـة تُغلـق فقـط للتـزود بالوقـود كل عامـين تقريبًـا ، كـما أنهـا توفـر مصـدرًا أساسـيًا للطاقـة عـلى مـدار السـاعة ، وفى حالـة الانشـطار النـووى تنقسـم ذرات اليورانيـوم إلى عنـاصر أخـف ، واليورانيوم معـدن مُشـع يُسـتخرج مـن المناجـم خاصـة فى كازاخسـتان واسـتراليا وناميبيـا ، وبعـد عمليـة تقسـيم اليورانيـوم تظـل عنـاصر الوقـود المُسـتخدم مُشـعة ويجـب تخزينهـا فى مسـتودعات النفايـات النوويـة أو مُجمعـات الوقـود المسـتهلك ، وغالبًـا مـا تكـون هـذه المواقـع تحـت الأرض وتتطلـب جدرانًـا معدنيـة أو خرسـانية سـميكة لحمايـة الجمهـور مـن الإشـعاع .

واعتبـارًا مـن عـام ٢٠٢٢ يوجـد ٤٣٩ مفاعـلًا نوويًـا قيـد التشـغيل فى ٣٢ دولـة حـول العـالم تُنتـج مـا يقـرُب مـن ١٠٪ مـن الكهربـاء العالميـة ، منهـا ٩٢ مفاعـل فى الولايـات المتحـدة ، ٥٦ فى فرنسـا ، ٥٤ فى الصـين ، و٣٧ فى روسـيا ، ومـن بـين تلـك الـدول فقط فرنسـا وسـلوفاكيا وأوكرانيا وبلجيكا تسـتخدم الطاقـة النوويـة كمصـدر لغالبية إمـدادات الكهربـاء في البـلاد ، بينـما تمتلـك دول أخـرى كميـات كبـيرة مـن القـدرة عـلى توليدهـا مـما جعلهـا أكـبر منتجـي الكهربـاء النوويـة عالمياً وهـى الولايـات المتحدة بقـدرة ٧٧١٦٣٨ جيجاوات/سـاعة ، تليهـا الصين بقـدرة ٣٨٣٢٠٥ جيجاوات/ساعة ، كـما يوجـد ٥٦ مفاعـلاً قيـد الإنشـاء بقـدرة صافيـة تبلـغ ٥٧٨٤٨ ميجـاوات ، ومـن بـين المفاعـلات قيـد الإنشـاء يوجـد ١٧ مفاعلًا بقـوة ١٧٣٦٥ ميجـاوات فى الصـين و ٨ مفاعـلات بقـدرة ٦٠٢٨ ميجـاوات في الهنـد .

وفى تقريـر لوكالـة الطاقـة الدوليـة تؤكـد فيـه أن الطاقـة النوويـة بصفتهـا مصـدرًا منخفـض الانبعاثـات يُمكنهـا أن تـؤدي دورًا جيـدًا للمسـاعدة فى إزالـة الكربـون مـن قطـاع الكهربـاء ، حيـث يتطلـب الوصـول إلى الحيـاد الكربـونى بحلـول منتصـف القـرن الحـالى إزالـة الكربـون عـن قطـاع الكهربـاء بشـكل كامـل ، وتوضـح الوكالـة أن الطاقـة النوويـة تُسـهم بسـعتها البالغـة ٤١٣ جيجـاوات فى تجنّـب ١,٥ جيجاطـن

من الانبعاثات عالميًا ، وتوفر ١٨٠ مليار متر مكعب من الغاز سنويًا ، وشددت الوكالة على أن انخفاض الطاقة النووية قد يؤدى إلى جعل طموحات التخلُص من الانبعاثات أكثر صعوبة وتكلفة ، وترى أن توفير التمويل الحكومى ضروريًا لتعبئة استثمارات جديدة سواء لبناء مفاعلات نووية أو تطوير تقنيات نووية ، كما أوضحت أن الأسعار المرتفعة مؤخرًا للنفط والغاز والكهرباء سيكون حافزًا كبيرًا لنشر الطاقة النووية ، مشيرة إلى امتلاك ١٩ دولة حاليًا مفاعلات نووية قيد الإنشاء ، وتوقّعت أن تُصبح الصين أكبر مُنتج للطاقة النووية قبل حلول عام ٢٠٣٠ ، مشيرة إلى أن الاقتصادات الناشئة والنامية تُمثّل أكثر من ٩٠٪ من النمو العالمى ، كما تتوقع ارتفاع الاستثمار العالمى فى الطاقة النووية إلى أكثر من ١٠٠ مليار دولار بحلول عام ٢٠٣٠ ، مع استمراره لأعلى من ٨٠ مليار دولار حتى ٢٠٥٠ .

مزايا وعيوب الطاقة النووية

بينما تضُخ مصادر توليد الوقود الأحفورى التقليدية كميات هائلة من ثانى أكسيد الكربون (السبب الرئيسي لتغير المناخ العالمي) فى الغلاف الجوى ، فإن محطات الطاقة النووية لا تنتج ثانى أكسيد الكربون ، وبمُقارنة مرافق الطاقة النظيفة الشائعة الأخرى (خاصة طاقة الرياح والطاقة الشمسية) ، تشغل محطات الطاقة النووية مساحة أقل بكثير ، حيث تشغل المنشأة النووية النموذجية التى تُنتج ١٠٠٠ ميجاوات من الكهرباء حوالى ميل مربع واحد من المساحة ، وبالمُقارنة تستهلك مزرعة الرياح التى تنتج نفس الكمية من الطاقة مساحة أرض تبلغ ٣٦٠ ضعفًا باستخدام ٤٣١ توربينة رياح ، وتستخدم مزرعة شمسية كبيرة الحجم ٧٥ ضعفًا عن طريق ٣,١٢٥ مليون من الألواح الشمسية.

كما تنتج محطات الطاقة النووية مستويات عالية من الطاقة مقارنة بمعظم مصادر الطاقة (خاصة مصادر الطاقة المتجددة) مما يجعلها مزودًا رائعًا للكهرباء الأساسية ، وهى واحدة من أكثر أنواع الطاقة المُتاحة كفاءة فى الوقت الحاضر بتفوق عامل قدرة متوسط بنسبة 91% على أشكال الطاقة الأخرى بهامش كبير ، حيث ينتج الغاز الطبيعى فى المتوسط 50% بينما يُنتج الفحم طاقة بنسبة 59% تقريبًا ، وأخيرًا تُعد الطاقة النووية مصدرًا موثوقًا

للطاقة المتجددة استنادًا إلى إنتاجها المستمر وسهولة الوصول إليها، وتنتج محطات الطاقة النووية أقصى إنتاج للطاقة في كثير من الأحيان أكثر من أي مصدر آخر للطاقة ، وبسبب هذا الاستقرار على مدار الساعة فإن هذا يجعل الطاقة النووية مصدرًا مثاليًا للكهرباء الأساسية الموثوقة للشبكة .

ويُعد تشغيل محطة للطاقة النووية مسعى مُنخفض التكلفة نسبيًا ، لكن بنائه فى المقام الأول مكلف للغاية ، والمفاعلات النووية هى أجهزة مُعقدة تتطلب العديد من مستويات الأمان المبنية حولها مما يزيد من تكلفة المحطات النووية الجديدة ، وتُعتبر النفايات النووية مُنتجًا ثانويًا خطيرًا لمحطات الطاقة النووية ، ويتطلب الأمر عناية فائقة وتكنولوجيا مُتقدمة للتعامل معها بشكل صحيح .

اقتصاديات الطاقة النووية فى إنتاج الكهرباء:

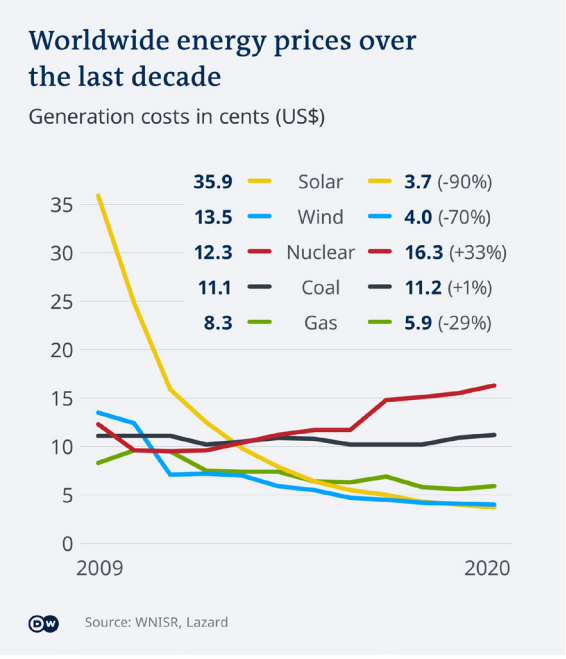
يُعتبر بناء محطة الطاقة النووية نموذجاً لمشاريع البنية التحتية الكبيرة فى جميع أنحاء العالم والتي تميل تكاليفها وتحدياتها إلى التقليل من تقديرها ، فالطاقة النووية تنافسية من حيث التكلفة مع الأشكال الأخرى لتوليد الكهرباء باستثناء الحالات التي يكون فيها الوصول المباشر إلى الوقود الأحفورى منخفض التكلفة ، كما أن تكاليف الوقود للمحطات النووية هي نسبة ضئيلة من إجمالي تكاليف التوليد ، على الرغم من أن تكاليف رأس المال أكبر من تلك الخاصية بالمحطات التى تعمل بالفحم وأكبر بكثير من تلك التي تعمل بالغاز ، وأيضاً تكاليف أنظمة الطاقة النووية أقل بكثير من تكاليف مصادر الطاقة المتجددة المتقطعة مثل طاقة الشمس وطاقة الرياح ، وعند تقييم اقتصاديات الطاقة النووية يتم أخذ تكاليف إيقاف التشغيل والتخلص من النفايات فى الاعتبار بالكامل .

ويُعتبر الفحم وسيظل على الأرجح جذابًا اقتصاديًا في بلدان مثل الصين وأستراليا ، طالما أن انبعاثات الكربون خالية من التكلفة أو غير محسوبة التكلفة بالكامل ، وأيضاً يُعتبر الغاز مُنافسًا لطاقة الحمل الأساسى في العديد من الأماكن لا سيما باستخدام محطات الدورة المركبة ، وتعتبر الطاقة النووية منافسة للوقود الأحفوري كوسيلة لتوليد الكهرباء ، وعادة ما يتم تضمين

تكاليف التخلص من النفايات وإيقاف التشغيل بالكامل في تكاليف التشغيل ، وإذا ما تم أخذ التكاليف الاجتماعية والصحية والبيئية للوقود الأحفوري فى الاعتبار أيضًا فهذا يُحسن من القُدرة التنافسية للطاقة النووية ، فعلى مدى السنوات الخمسين الماضية أدى استخدام الطاقة النووية إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بأكثر من ٦٠ جيجا طن أى ما يقرب من عامين من الانبعاثات العالمية المرتبطة بالطاقة ، وهذا يعنى أن «التوسع في الطاقة النووية» كان الوسيلة الأساسية لتحقيق أهداف خفض الكربون لعام ٢٠٣٠ ، ويوضح شكل (١٤) الأسعار العالمية للطاقة خلال العقد الماضى .

شكل (١٤)

أسعار الطاقة العالمية خلال العقد الماضى



دور الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)

تضع الوكالة الدولية للطاقة الذرية المعايير والتوجيهات الدولية للاستخدام الآمن والمأمون للطاقة النووية لحماية الناس والبيئة ، وتدعم البرامج النووية

الحالية والجديدة حول العالم من خلال توفير الدعم التقنى ، وتوفر الخبرة الفنية والإرشادات للبلدان التي ترغب فى تطوير برنامج للطاقة النووية وكذلك لأولئك الذين يوقفون تشغيل برنامجهم .

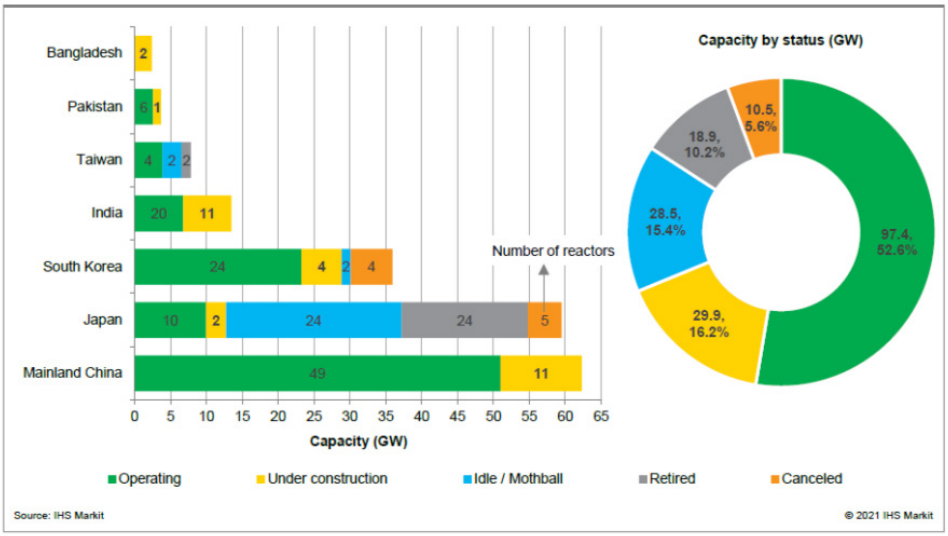
ومن خلال ضمناتها وأنشطة التحقق تُشرف الوكالة على عدم تحويل المواد والتكنولوجيات النووية عن الاستخدام السلمى ، وتُقدم بعثات المراجعة والخدمات الاستشارية الإرشادات بشأن الأنشطة الضرورية خلال عُمر إنتاج الطاقة النووية بدءاً من تعدين اليورانيوم إلى بناء وصيانة وإيقاف تشغيل محطات الطاقة النووية وإدارة النفايات النووية ، كما تُدير الوكالة احتياطيًا من اليورانيوم مُنخفض التخصيب (LEU) فى كازاخستان ، والذى يُمكن استخدامه كملاذ أخير من قبل البلدان التي هى في حاجة ماسة لليورانيوم مُنخفض التخصيب للأغراض السلمية .

تطور الطاقة النووية في آسيا :

كان النمو فى قُدرة توليد الكهرباء وخاصة من الطاقة النووية محدودًا لسنوات عديدة فى آسيا ، حيث كانت أول محطة للطاقة النووية فى جنوب شرق آسيا هى محطة باتان للطاقة النووية التى بنتها الفلبين وسط أزمة النفط عام ١٩٧٣ واكتمل بناؤها فى عام ١٩٨٤ ، ولكن الآن أصبحت آسيا هي المنطقة الرئيسية فى العالم التى تنمو فيها قدرة توليد الكهرباء وخاصة الطاقة النووية بشكل كبير ، حيث يوجد فيها حوالى ١٤٠ مفاعل طاقة نووية تحت التشغيل ، و ٣٧ قيد الإنشاء وخطط ثابتة لبناء ٥٦ مفاعلًا إضافيًا ويتم اقتراح المزيد ، ويوجد حاليًا حوالى ثلثى المفاعلات قيد الإنشاء فى جميع أنحاء العالم فى آسيا ، ويشترك البر الرئيسي للصين والهند فى العديد من الدوافع المشتركة لتطوير الطاقة النووية ، ومن المتوقع أن يكونا المروجين الأساسيين لهذه الصناعة فى منطقة آسيا والمحيط الهادئ حيث يستهدف البر الغربى للصين الوصول إلى ٧٠ جيجاوات بحلول عام ٢٠٢٥ ، على حين تسعى الهند للوصول إلى ٢٧,٥ جيجاوات بحلول عام ٢٠٣٠ .

شكل (١٥)

يوضح قدرة الطاقة النووية وعدد المفاعلات فى قارة آسيا اعتبارًا من يونيو ٢٠٢١



وعن الآفاق المُحتملة للطاقة النووية فى دول آسيا نجد أن كُلاً من بنجلاديش وتركيا تقوم ببناء أولى محطاتها للطاقة النووية (مفاعلات قيد الإنشاء) ، على حين نجد أن أوزبكستان لديها خطط مُلتزمة لتطوير البنية التحتية القانونية والتنظيمية لإنتاج الطاقة النووية ، بينما تايلاند وأندونيسيا وكازاخستان وفيتنام لديها خطط جيدة الإعداد لكن الالتزام مُعلق أو مؤجل ، كما نجد أن منغوليا وسنغافورة وأذربيجان وسريلانكا وسوريا لديها برنامج للمناقشة كخيار سياسى، أما ميانمار وماليزيا وكمبوديا وسوريا فالطاقة النووية رسمياً ليست خياراً سياسياً ، أما بالنسبة لدول الخليج الست فإن السعودية تقود اتفاق مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية على التعاون فى دراسة جدوى لبرنامج إقليمى للطاقة النووية وتحلية المياه ، وبالنسبة للعراق فإنها تُخطط لبناء ثمانية مفاعلات بسعة حوالى ١١ جيجاوات ، وستسعى للحصول على تمويل من شركاء محتملين لخطة ٤٠ مليار دولار لتسديد التكاليف على مدى ٢٠ عامًا ، وهي تدرس البائعين الكوريين الجنوبيين والروس .

-الطاقة النووية فى الصين:

يرجع الدافع بشكل مُتزايد وراء الطاقة النووية فى الصين إلى تلوث الهواء من المحطات التى تعمل بالفحم وتُغير المناخ ، مما جعلها تمضى قُدُماً فى بناء محطات طاقة نووية جديدة ، وقد أصبحت الصين مكتفية ذاتيًا إلى حد كبير فى تصميم المفاعلات وبنائها ، بالإضافة إلى جوانب أخرى من دورة الوقود ، لكنها تستفيد بالكامل من التكنولوجيا الغربية مع تكييفها وتحسينها ، حيث زاد التوليد من الطاقة النووية خلال فترة العشر سنوات الأخيرة بحوالى ٤٠٠٪ .

ولدى الصين ٥٤ مفاعلًا قيد للتشغيل بقدرة ٥٢,٢ جيجاوات ، و ٢٢ مفاعلًا قيد الإنشاء بقدرة ٢٤,٧ جيجاوات ، والوحدات قيد الإنشاء حاليًا هى مزيج من التصميمات الصينية والغربية ، بالإضافة إلى ٤٢ مفاعلاً مُخططًا لإنشائها بقدرة ٤٦,١ جيجاوات .

-الطاقة النووية فى اليابان

تحتاج اليابان إلى استيراد حوالي 90٪ من احتياجاتها من الطاقة حيث بدأ مفاعلها النووى التجارى الأول العمل في منتصف عام 1966 ، فقد كانت الطاقة النووية أولوية استراتيجية وطنية منذ عام 1973 لتولد ما يصل إلى ٣٠٪ من طاقتها الكهربائية من الطاقة النووية حتى عام ٢٠١١ ، وكان من المتوقع أن تزداد المساهمة النووية إلى ٤١٪ بحلول عام ٢٠١٧ ، وكانت الخطط طويلة الأجل تتمثل في مُضاعفة القدرة النووية إلى ٩٠ جيجاوات بحلول عام ٢٠٥٠ ، ومع ذلك وبعد حادث فوكوشيما في مارس ٢٠١١ تم إسقاط هذه الخطط ، ومن المتوقع أن توفر الطاقة النووية حوالى ٢٠ ٪ من الكهرباء بعد الانتهاء من عملية إعادة تشغيل محطة فوكوشيما النووية بالكامل .

ولدى اليابان الآن٣٣ مفاعلًا قابلاً للتشغيل بقدرة 31.7 جيجاوات على الرغم من أن العديد منها مُغلق مؤقتًا ، وتُعد محطة Kashiwazaki-Kariwa التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية (TEPCO)حاليًا أكبر محطة للطاقة النووية فى العالم ، بالإضافة إلى مفاعلان قيد الإنشاء بقدرة ٢,٨ جيجاوات بالإضافة إلى مفاعل واحد مخطط لإنشائه بقدرة ١,٤ جيجاوات بسعة صافية تبلغ ٧٩٦٥ ميجاوات ، واليابان مُلتزمة بإعادة معالجة الوقود المستخدم لاستعادة اليورانيوم

والبلوتونيـوم لإعـادة اسـتخدامه فى إنتـاج الكهربـاء .

شكل (١٦)

يوضح صورة محطة Kashiwazaki-Kariwa

-الطاقة النووية فى كوريا الجنوبية

تُلبـى كوريـا الجنوبية مـا يقـرُب مـن ٢٥٪ مـن احتياجاتهـا مـن الكهربـاء مـن الطاقـة النوويـة ، ولطالمـا كانـت الطاقـة النوويـة أولويـة اسـتراتيجية لكوريـا الجنوبية لكـن الرئيـس المنتخـب فى عـام ٢٠١٧ قـدم سياسـة للتخلـص التدريجـى مـن الطاقـة النوويـة عـلى مـدار حـوالى ٤٥ عامًـا ، وجـاء الرئيـس التـالي يـون سـوك يـول الـذى تـم انتخابـه فى مـارس ٢٠٢٢ ليتعهـد بإلغـاء هـذه السياسـة ، وحـدد هدفًـا للطاقـة النوويـة لتوفـير مـا لا يقـل عـن ٣٠ ٪ مـن الكهربـاء فى عـام ٢٠٣٠ .

ولـدى كوريـا 25 مفاعـلاً قيـد التشـغيل بقـدرة 24.4 جيجـاوات ، بالإضافـة لثلاثـة مفاعـلات قيـد الإنشـاء بقـدرة 4.2 جيجـاوات ، وتعـد كوريـا الجنوبيـة مـن بـين أبـرز دول العـالم في مجـال الطاقـة النوويـة ، حيـث تُصـدر تقنياتهـا عـلى نطـاق واسع وتشـارك حاليـا فى بنـاء أربعـة مفاعـلات نوويـة فى الإمـارات بموجـب عقـد قيمتـه ٢٠ مليـار دولار .

-الطاقة النووية فى الهند

وضعت حكومة الهند أهدافًا طموحة لتنمية القدرة النووية ، ونظرًا لأن الهند خارج مُعاهدة عدم انتشار الأسلحة النووية بسبب برنامج أسلحتها ، فقد تم استبعادها لمدة ٣٤ عامًا من التجارة فى المفاعلات والمواد النووية مما أعاق تطويرها للطاقة النووية المدنية حتى عام ٢٠٠٩ ، وبسبب الحظر التجارى السابق ونقص اليورانيوم المحلى ، طورت الهند بشكل فريد دورة وقود نووى لاستغلال احتياطياتها من الثوريوم ، والهند لديها ٢٢ مُفاعلاً تحت للتشغيل بقدرة 6.8 جيجاوات ، و 8 مفاعلات قيد الإنشاء بقدرة 6.7 جيجاوات ، بالإضافة إلى 12 مفاعلاً مخططًا لتنفيذها بقدرة 8.4 جيجاوات .

-الطاقة النووية في باكستان

نشأت قُدرات الأسلحة النووية الباكستانية بشكل مستقل عن دورة الوقود النووى المدنية باستخدام اليورانيوم المحلى، ولأن باكستان خارج مُعاهدة عدم انتشار الأسلحة النووية بسبب برنامج أسلحتها ، فهى مُستبعدة إلى حد كبير من التجارة في المفاعلات أو المواد النووية مما يعيق تطويرها للطاقة النووية المدنية ، ومع ذلك فإن الصين إيجابية بشأن التعاون النووى معها والتى أصبح لديها ستة مُفاعلات قيد التشغيل قدمتها لها الصين بقدرة 3256 ميجاوات .

-الطاقة النووية فى تايوان

تمتلك تايوان ثلاث مُفاعلات قيد التشغيل بقدرة ٢٩٤٥ ميجاوات تُمثل حوالى ١١٪ من توليد الكهرباء فى الجزيرة ، وفى عام ٢٠١٥ وقبل إغلاق ٣ مفاعلات أخرى كان يُشكل الإنتاج ١٩٪ من توليد الكهرباء فى الدولة ، ونتيجة لانتشار الصدوع الزلزالية النشطة عبر الجزيرة فإن دُعاة حماية البيئة المناهضون للطاقة النووية يجادلون بأن تايوان غير مُناسبة للمحطات النووية ، وفى تقرير عام ٢٠١١ من قبل مجموعة الدفاع عن البيئة قام بتقييم الخطر الزلزالى للمفاعلات فى جميع أنحاء العالم على النحو الذي تُحدده بيانات البرنامج العالمى لتقييم المخاطر الزلزالية ، فقد وضع جميع مفاعلات تايوان ضمن مجموعة المخاطر الأعلى من مجموع ١٢ مفاعلًا فى المناطق ذات الخطورة الزلزالية العالية جدًا ، جنبًا إلى

جنب مع بعض المفاعلات اليابانية .

- الطاقة النووية في الإمارات

شرعت الإمارات في برنامج للطاقة النووية بالتشاور الوثيق مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية ، وقبلت عرضًا بقيمة ٢٠ مليار دولار من كونسورتيوم كورى جنوبى لبناء أربعة مفاعلات نووية تجارية بإجمالى ٥,٦ جيجاوات فى بركة ، حيث تم توصيل الوحدة الأولى من أول محطة للطاقة النووية فى البلاد بالشبكة في أغسطس ٢٠٢٠ ، تلتها الوحدة ٢ فى سبتمبر ٢٠٢١ والوحدة ٣ في أكتوبر ٢٠٢٢ ليكون إجمالى القدرة الكهربية 4035 ميجاوات ، بالإضافة إلى مفاعل واحد قيد الإنشاء بقدرة1345 ميجاوات .

الخاتمـــــة

لقد تغير الوضع العالمي للطاقة النووية بشكل كبير خلال ٣٥ عامًا الماضية مُنذ كارثة تشيرنوبيل ، وحتى فى السنوات العشر مُنذ بدء كارثة فوكوشيما دايتشى ، فأصبحت مشاريع البناء النووية الجديدة قليلة ومُتباعدة ، حتى فى البلدان شديدة الاعتماد عليها مثل فرنسا والولايات المتحدة الأمريكية ، ومن ناحية أخرى نجد أن بعض الدول ولا سيما الصين تمضى قُدما بنشاط فى بناء محطات طاقة نووية جديدة ، وتم بناء ٢٠ محطة طاقة جديدة للمساعدة فى التحول من طاقة الوقود الأحفورى ، وبالرغم من ارتفاع تكاليف البناء فهى أداة لا تُقدر بثمن عندما يتعلق الأمر بتقييم موضوعى للوضع الذى تواجهه صناعة الطاقة النووية فى دولة مثل اليابان ، فإن معايير السلامة والأمان النووى التي يجب الوفاء بها أصبحت أكثر صرامة من أى وقت مضى على مستوى العالم .

حيث تعد الطاقة النووية مصدر طاقة نظيف خالٍ من الانبعاثات ويمكن أن يُنتج طاقة حمل أساسية بشكل أكثر موثوقية من مصادر الرياح أو الطاقة الشمسية المتغيرة ، لذلك يجب الحفاظ على القُدرة الحالية بدلاً من التخلص التدريجى منها فى بعض الدول إذا كان سيتم الوفاء بأهداف إزالة الكربون ، ويُمثل تحقيق وتيرة خفض انبعاثات ثانى أكسيد الكربون بما يتماشى مع

اتفاقية باريس تحديًا كبيرًا بالفعل ، مما يجعلنا نوصى بالعديد من الإجراءات الحكومية المُحتملة التى تهدف إلى ضمان أن محطات الطاقة النووية الحالية يُمكن أن تعمل طالما أنها آمنة ، كما ندعم زيادة الطاقة النووية وتشجيع إنشاءات نووية جديدة بالإضافة إلى تطوير التقنيات النووية .

وإلى جانب مصادر الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة والتقنيات المُبتكرة الأخرى ، يُمكن للطاقة النووية أن تُساهم بشكل كبير فى تحقيق أهداف الطاقة المُستدامة وتعزيز أمن الطاقة ، ومع مواجهة الطاقة النووية لمُستقبل غير مؤكد فى العديد من البلدان ، فإن العالم يخاطر بتراجع حاد فى استخدامها فى الاقتصادات المتقدمة وهذا قد يؤدى إلى مليارات الأطنان من انبعاثات الكربون الإضافية ، وعلى الجانب الآخر اختارت بعض الدول الانسحاب من الطاقة النووية فى ضوء مخاوف تتعلق بالسلامة وقضايا أخرى ، ومع ذلك لا يزال العديد من الدول يرون دورًا مهماً للطاقة النووية فى تحولات الطاقة الخاصة بهم ، لكنهم لا يفعلون ما يكفى لتحقيق أهدافهم .

المراجع

1. A. Asle Zaeem et al "Aneutronic Fusion in Collision of Oppositely Directed Plasmoids" Plasma Physics Reports, Vol. 44, No. 3, pp. 378–386 (2018).
2. Aspinwall, Nick (2019): "Tao indigenous Community Demands Removal of Nuclear Waste From Taiwan Orchid Island". The Diplomat. Retrieved 29 February 2020.
3. Bonner, Elena (2005): "Sakharov is Tokamak Originator" Physics Today, Vol. 58, no. 12. College Park, MD, USA: American Institute of Physics. p. 15, Retrieved 20 March 2021.
4. Braams, C.M.; Stott, P.E. (2010): "Nuclear Fusion: Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Reaearch". Nuclear Fusion: Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research/ C.m. Braams and P.E. Stott. Bristol; Philadelphia: Iop; C2002. pp. 250. ISBN 978-0-7503-0705-5.
5. Butler, Declan (2005): "Japan consoled with contracts as France snares fusion project". Nature. London, England: Springer Nature Group. Retrieved 20 March 2021.
6. Chen, Hongli; Pan, Lei; Lv, Zhongliang; Li, Wei; Zeng, Qin (2016): "Tritium fuel cycle modeling and tritium breeding analysis for CFETR". Fusion Engineering and Design. 106: 17–20. ISSN 0920-3796.
7. "Despite conflict, Russia sends France giant magnet for nuclear fusion project". Available at:
http://www.euractiv.com. 2 November 2022.
8. Don Shapiro (2013): "Taiwan Economy: Near-term Uptick, Longer-term Challenges". Institution, Retrieved 20 August 2015.
9. Doshi, Bharat; Reddy, D. Chenna (2017): "Safety and Environment aspects of Tokamak-type Fusion Power Reactor- An Overview". Journal of PhysF ics: Conference Series. 823: 012044. ISSN 1742-6596.

10. Freidberg, J. P.; Mangiarotti, F. J.; Minervini, J. (2015): "Designing a tokamak fusion reactor-How does plasma physics fit in?" Physics of Plasmas, 22 (7): 070901. ISSN 1070-664X.
11. Griffith, Sabina (2007): "The ITER Design – Updated". ITER Newsline. St. Paul-lez-Durance, France: ITER. Retrieved 20 March 2021.
12. H. Von Halban; F. Joliot & L. Kowarski (1939): "Number of Neutrons Liberated in the Nuclear Fission of Uranium". Nature. 143 (3625): 680V.
13. Idd, Steve (2011): "New reactors-more or less"? Nuclear Engineering International, Archived from the original on 12 December 2011.
14. Jeff Tollefson (2021): "US achieves laser-fusion record: what it means for nuclear-weapons research, Scientists are hopeful that the National Ignition Facility's recent success will advance understanding of thermonuclear reactions." Nature 597,163164.
15. J. Chittendon, "The Z-Pinch Approach to Fusion," Physics World 13, No. 5, 39 (2000).
16. J. Jacquinot, "Fifty Years in Fusion and the Way Forward," Nucl. Fusion 50, 014001 (2010).
17. Kaiser, Peter; Madsen, Michael (2013): Atom Mirny: "The World First Civilian Nuclear Power Plant". IAEA Bulletin (Online) (in Rusł sian). 54 (4): 5–7. ISSN 1564-2690.
18. Kramer, David (2011): "DOE looks again at inertial fusion as potential clean-energy source". Physics Today. 64 (3): 26–28.
19. Lee, Min. Nuclear Energy Development in Asia Problems and Prospects (Energy, Climate and the Environment Series ed.). Palgrave. P 171. ISBN 978-0-230-22150-5.
20. Li, Jiangang; Wan, Yuanxi (2019): "Present State of Chinese Magnetic Fusion Development and Future Plans". Journal of Fusion Energy. 38 (1):

113–124. ISSN 1572-9591.

21. Luo, Q-ZP; D'Angelo, N; Merlino ،R. L. (1998): Shock formation in a negative ion plasma (PDF). Department of Physics and Astronomy. Archived from the original (PDF) on 2016-08-31, Retrieved 2011-11-20.
22. Marion Brünglinghaus (2013): "Nuclear fission". European Nuclear Soci{ ety, Archived from the original on 201317-01-, Retrieved 2013-01-04.
23. Naranjo, B.; Putterman, S.; Venhaus, T. (2011). "Pyroelectric fusion using a tritiated target". Nuclear Instruments and Methods in Physics Ree search Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 632 (1): 43–46.
24. Nian, Victor; Mignacca, Benito; Locatelli, Giorgio (2022): "Policies toward net-zero: Benchmarking the economic competitiveness of nuclear against wind and solar energy". Applied Energy, 320 119275, ISSN 0306-2619.
25. Nie, Baojie; Ran, Guangming; Zeng, Qin; Du, Hongfei; Li, Zaixin; Chen, Yanjing; Zhu, Zuolong; Zhao, Xueli; Ni, Muyi; Li, Fengchen (2019): Insights into fuel start-up and self sufficiency for fusion energy: The case of CFETR. Energy Science, 48 (12).
26. NPR's Rebecca Hersher (2022): "U.S. reaches a fusion power milestone. Will it be enough to save the planet?". Science, update December 13, 2022, Geoff Brumfiel.
27. Shen, Xinyuan; Chen, Zhibin; Wang, Zhen; Wang, Haixia; Chen, Shanqi; Ge, Daochuan; Chen, Chao; Jiang, Jieqiong; Hu, Liqin; Yu, Jie; Wu, Yican (2019): "Safety regulatory framework for hydrogen fusion reactors in China". International Journal of Hydrogen Energy, 44 (40): 22704 – 22711.
28. S. H. Glezner et al. (2010): "Symmetric Inertial Confinement Fusion

Implosions at Ultra-High Laser Energies". Science 327, 1228.

29. Sturrock ،Peter A. (1994): "Plasma Physics: An Introduction to the theory of Astrophysical, Geophysical & Laboratory Plasmas". Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-44810-9.
30. Vermote, et al. (2008): "Comparative study of the ternery particle emission in 243-Cm (nth,f) and 244-Cm (SF) in Dynamical aspects of nuclear fission: proceedings of the 6th International Conference. J. Kliman, M. G. Itkis, S. Gmuca (eds.). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore.
31. V, Kopeikin; L, Mikaelyan and; V, Sinev (2004). "Reactor as a Source of Antineutrinos: Thermal Fission Energy". Physics of Atomic Nuclei. 67 (10): 1892.
32. Wang, Zhen; Chen, Zhibin; Chen, Chao; Ge, Daochuan; Perrault, Didier; Zucchetti, Massimo; Subbotin, Michail (2021): "Quantitative Safety goals for fusion power plants: Rationales and suggestions". International Journal of Energy Research, 45 (6): 9694–9703.
33. Wan, Yuanxi; Li, Jiangang; Liu, Yong; Wang, Xiaolin; Chan, Vincent; Chen, Changan; Duan, Xuru; Fu, Peng; Gao, Xiang; Feng, Kaiming; Liu, Songlin (2017): "Overview of the present progress and activities on the CFETR". Nuclear Fusion. 57 (10): 102009.
34. William, Kaspar et al. (2013). "A Review of the Effects of Radiation on Microstructure and Properties of Concretes Used in Nuclear Power Plants." Washington, D.C.: Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.