مجلة انساق
للنشر العلمى

مجلة انساق للنشر العلمى

الإصدار الثانى
المجلد (٢) العدد (١)
٢٠٢٦ (١- ٢٢)

تصميم مفاعل اندماجى صغير متنقل للاستخدامات الفضائية والبعثات طويلة الأمد

د.م/ خالد غيث القزيري
(رئيس مجلس إدارة جمعية البيان للعلوم وعضو الوكالة الدولية للطاقة الذرية)
تاريخ النشر: نُشر إلكترونياً بتاريخ ٢٠ يناير ٢٠٢٦ م

الملخص :

يهدف هذا البحث إلى دراسة جدوى تصميم مفاعل اندماج نووي صغير الحجم وعالي الكفاءة وقابل للنقل، لتلبية احتياجات الطاقة للتطبيقات الفضائية والمهام طويلة الأمد. ونظرًا للقيود الصارمة التي تفرضها بيئات الفضاء من حيث الكتلة والحجم والموثوقية والسلامة، يُصبح الاندماج النووي خيارًا استراتيجيًا واعدًا مقارنةً بمصادر الطاقة التقليدية. يستند البحث إلى تحليل علمي وتقني معمق لمبادئ الاندماج النووي والتقنيات الحديثة لمفاعلات الاندماج المدمجة، ويطور مفهومًا تصميميًا مبتكرًا يختلف عن النماذج السابقة، مع الاستناد إلى الدراسات المنشورة دون إعادة إنتاجها.

الكلمات المفتاحية:

(الاندماج النووي، مفاعل اندماجي، المهام الفضائية، البعثات طويلة الأمد)

Abstract

This research aims to study the feasibility of designing a compact, highly efficient, and portable nuclear fusion reactor to meet the energy needs of space applications and long-duration missions. Given the stringent limitations imposed by space environments in terms of mass, size, reliability, and safety, nuclear fusion is becoming a promising strategic option compared to conventional energy sources. The research is based on an in-depth scientific and technical analysis of nuclear fusion principles and modern technologies for compact fusion reactors. It develops an innovative design concept that

differs from previous models, drawing on published studies without simply reproducing them.

Keywords:

(Nuclear fusion, fusion reactor, space applications, Long-Duration Missions)

١. مقدمة

تُعدّ الطاقة من أكثر التحديات تعقيدًا وحساسية في مجال استكشاف الفضاء الحديث، لا سيما مع التوجه العالمي نحو إجراء مهام فضائية طويلة الأمد إلى القمر والمريخ، وربما إلى ما هو أبعد من ذلك في العقود القادمة. لا يعتمد نجاح أي مهمة فضائية على تقنيات الإطلاق أو أنظمة الملاحة فحسب، بل يعتمد بالدرجة الأولى على توفر مصدر طاقة مستقر وعالي الكفاءة قادر على العمل لفترات طويلة في بيئات قاسية معزولة عن أي دعم لوجستي خارجي. وتشير تقارير ناسا إلى أن متطلبات الطاقة للبعثات المستقبلية ستكون أعلى بكثير من متطلبات البعثات المدارية التقليدية، لا سيما مع توسع الأنشطة العلمية وأنظمة دعم الحياة وتقنيات الدفع المتقدمة (ناسا، ٢٠٢٠، ص ٣-٥).

وتعتمد أنظمة الفضاء الحالية بشكل أساسي على مصادر الطاقة التقليدية، مثل الألواح الشمسية ومولدات الطاقة الكهروحرارية بالنظائر المشعة. ورغم نجاح هذه التقنيات في العديد من البعثات السابقة، إلا أنها تعاني من قيود جوهرية تحد من قدرتها على تلبية متطلبات استكشاف الفضاء في المستقبل. فعلى سبيل المثال، تفقد الألواح الشمسية كفاءتها بشكل ملحوظ كلما ابتعدت المركبة الفضائية عن الشمس أو تعرضت لظروف غبارية قاسية، كتلك الموجودة على سطح المريخ. في الوقت نفسه، توفر المولدات النووية الحرارية طاقة محدودة نسبيًا، وهي غير مناسبة للتطبيقات التي تتطلب مستويات عالية من الطاقة الكهربائية (إل-جينك، ٢٠١٢، ص ١١٢-١١٤).

في هذا السياق، يبرز الاندماج النووي كمفهوم ثوري ومصدر طاقة واعد نظريًا. فهو يتميز بكثافة طاقة عالية للغاية، وإمداد غير محدود تقريبًا من الوقود، كما أنه أكثر أمانًا من حيث النفايات المشعة على المدى الطويل مقارنةً بالانشطار النووي. ومن خلال محاكاة التفاعلات التي تحدث في نوى النجوم، يسمح الاندماج النووي بإنتاج كميات هائلة من الطاقة من كميات صغيرة من الوقود، مثل الديوتيريوم والتريتيوم، مما يجعله خيارًا جذابًا للتطبيقات الفضائية التي تخضع لقيود صارمة على الكتلة والحجم (ويسون، ٢٠١١، ص ١-٤).

مع ذلك، فإن تحويل الاندماج النووي من مفهوم فيزيائي إلى نظام هندسي عملي، لا سيما في شكل مفاعل صغير متنقل، يطرح تحديات تقنية وعلمية معقدة. تشمل هذه التحديات تحقيق ظروف حصر البلازما، وضمان استقرار

التفاعل، وتطوير مواد قادرة على تحمل درجات الحرارة العالية وتدفقات النيوترونات، وتلبية متطلبات السلامة والموثوقية في بيئة الفضاء) منظمةITER ، ٢٠١٨، ص ٢٧-٣٠ .(وتزداد هذه التحديات تعقيدًا عند محاولة تصغير حجم المفاعل وجعله محمولًا وقابلًا للدمج في أنظمة فضائية متكاملة.

يهدف هذا البحث إلى مراجعة الإطار النظري والتطبيقي لتصميم مفاعل اندماج نووي صغير متنقل للتطبيقات الفضائية والمهام طويلة الأمد. ويركز البحث على تحليل متطلبات الفضاء، ودراسة تقنيات الاندماج النووي المتكاملة، وتطوير مفهوم تصميم مبتكر يمكن دمجه في المركبات الفضائية أو القواعد الكوكبية المستقبلية. علاوة على ذلك، يسعى البحث إلى تقديم منظور علمي يختلف عن النماذج السابقة، بالاستناد إلى الأدبيات العلمية الحديثة، مما يساهم في فتح آفاق جديدة لمستقبل الطاقة في استكشاف الفضاء.

٢.١. الاندماج النووي

الاندماج النووي عملية فيزيائية تتحد فيها نواتان خفيفتان لتكوين نواة أثقل، مطلقةً كمية هائلة من الطاقة وفقًا لمعادلة أينشتاين ($E=mc^2$). ويُعدّ تفاعل الديوتيريوم - التريتيوم التفاعل الأكثر شيوعًا في التطبيقات الهندسية.

يُبشّر الاندماج النووي، العملية التي تُغذّي الشمس، بقفزة نوعية نحو الطاقة المستدامة، بما يتماشى مع أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة، ولا سيما الهدف السابع (طاقة نظيفة وبأسعار معقولة) والهدف الثالث عشر (العمل المناخي). وبينما يسعى العالم جاهداً لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة والحاجة المُلحة لخفض انبعاثات الكربون، يُقدّم الاندماج النووي أفقاً واعداً: طاقة شبه غير محدودة وخالية من الكربون مع أدنى حد من التأثير البيئي.

على عكس الوقود الأحفوري، لا يُنتج الاندماج النووي أي انبعاثات غازات دفيئة، وعلى عكس الانشطار النووي، يُولّد الحد الأدنى من النفايات المشعة على المدى الطويل. تُمثّل التطورات في تكنولوجيا الاندماج النووي، كتلك التي تقودها شركة أنظمة الاندماج النووي التابعة للكومنولث (CFS) من خلال مفاعل SPARC، لحظةً محورية.

يُعدّ التصدّي لتحديات الاندماج النووي - من توسيع نطاقه، وضمان فعاليته من حيث التكلفة، ودمجه في شبكة الكهرباء - أمراً بالغ الأهمية لتحقيق أهداف الاستدامة العالمية وبناء مستقبل طاقة مرن وعادل. يُعدّ التصدي لتحديات الاندماج النووي، وتوسيع نطاقه، وخفض تكلفته، ودمجه في شبكة الكهرباء، أمراً بالغ الأهمية لتحقيق أهداف الاستدامة العالمية وبناء مستقبل طاقة مرن وعادل.

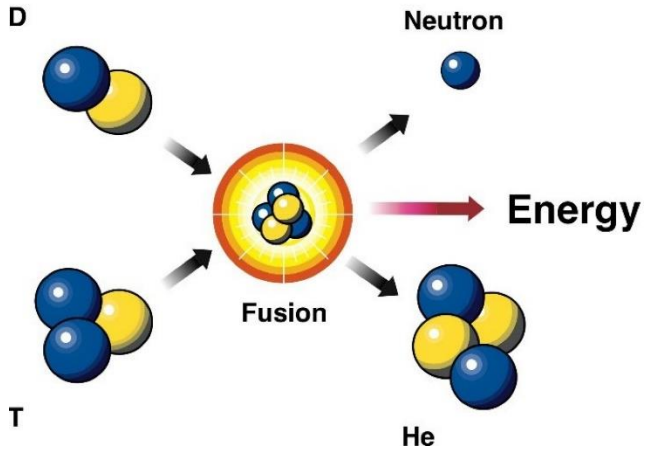
يُعدّ الاندماج النووي أحد أكثر المناهج العلمية طموحًا لإنتاج الطاقة. وهو قائم على نفس العملية الفيزيائية التي تُغذي الشمس والنجوم الأخرى، حيث تندمج النوى الخفيفة لتكوين نوى أثقل، مُطلقةً كميات هائلة من الطاقة. تكمن أهميته الاستراتيجية في إمكاناته النظرية لتوفير مصدر طاقة نظيف ومستدام وغير محدود تقريبًا، وهو ما يتوافق تمامًا مع

أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة، ولا سيما الهدف السابع المتعلق بالطاقة النظيفة بأسعار معقولة، والهدف الثالث عشر المتعلق بتغير المناخ (الأمم المتحدة، ٢٠١٥، ص ١٤-١٥). ونظرًا للطلب العالمي المتزايد باستمرار على الطاقة، والضغوط البيئية المصاحبة له والناجمة عن الاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري، يبرز الاندماج النووي كخيار جذري يُعالج الأسباب الجذرية للمشكلة بدلًا من مجرد التخفيف من آثارها. على عكس مصادر الطاقة التقليدية، لا ينتج عن الاندماج النووي أي انبعاثات غازات دفيئة أثناء التشغيل، كما أنه لا يعتمد على موارد محدودة جغرافيًا أو سياسيًا، إذ يتوفر وقوده الأساسي، مثل الديوتيريوم، بوفرة في مياه البحر (ويسون، ٢٠١١، ص ٣-٦). ويُعدّ الاختلاف الجوهري بين الاندماج النووي والانشطار النووي أحد أهمّ دوافع الاهتمام العالمي المتزايد بالاندماج. فبينما يعتمد الانشطار النووي على شطر نوى ثقيلة كاليورانيوم، مما ينتج عنه نفايات مشعة طويلة الأمد ومخاطر أمنية، ينتج عن الاندماج النووي نفايات مشعة محدودة نسبيًا وقصيرة الأمد، مع درجة أعلى من الاكتفاء الذاتي، إذ يتوقف التفاعل فورًا عند أول إشارة إلى أي خلل في ظروف التشغيل (ITER، ٢٠١٨، ص ٩-١١).

وقد شهدت العقود الأخيرة تطورات ملحوظة في تقنيات الاندماج النووي، مدفوعةً بالتقدم في فيزياء البلازما، والمواد المتقدمة، والموصلات الفائقة. من أبرز التطورات مشاريع تقودها شركات خاصة ومؤسسات بحثية، مثل شركة أنظمة الاندماج النووي التابعة للكومنولث (CFS)، التي طورت مفاعل SPARC. يستخدم SPARC مغناطيسات فائقة التوصيل ذات مجال مغناطيسي عالٍ لتحقيق حصر بلازما أكثر كفاءة ضمن حجم أصغر مقارنةً بالمفاعلات التقليدية (Suromons et al., 2021, pp. 2–4). مثّل هذا التوجه نقطة تحول في النظرة إلى الاندماج النووي، ليس فقط كمشروع علمي طويل الأمد، بل أيضاً كحل هندسي مجدٍ تجارياً. على الرغم من هذا التقدم، لا تزال هناك تحديات كبيرة في الانتقال من التجارب المختبرية إلى النشر التشغيلي واسع النطاق. تشمل هذه التحديات تحقيق توازن دقيق بين درجة الحرارة والشدة ومدة الحصر وفقاً لمعيار لوسون؛ وخفض التكاليف الرأسمالية؛ وضمان موثوقية التشغيل على المدى الطويل؛ ودمج أنظمة الاندماج في شبكات الطاقة الحالية أو التطبيقات المتخصصة مثل الأنظمة الفضائية (L-Genck and Tournier, 2014, pp. 87–90). يُعدّ التصدي لهذه التحديات خطوةً حاسمةً ليس فقط نحو تحقيق مستقبل طاقة منخفض الكربون، بل أيضاً نحو بناء نظام طاقة أكثر عدلاً ومرونة، قادر على تلبية احتياجات الدول المتقدمة والنامية على حدٍ سواء. وفي هذا السياق، يفتح الاندماج النووي آفاقاً جديدةً لتطبيقات غير تقليدية، بما في ذلك التطبيقات الفضائية، حيث يمكن لكثافة طاقته العالية ومستوى أمانه النسبي أن يُحدثا تحولاً جذرياً في مفهوم استقلال الطاقة للمهام طويلة الأمد.

٢.٢. شروط تحقيق الاندماج النووي

يتطلب تحقيق الاندماج النووي شروطًا صارمة، منها:



تصوير تفاعل اندماج الديوتيريوم (D) والتريتيوم (T)، والذي ينتج نواة هيليوم (أو جسيم ألفا) ونيوترون عالي الطاقة.

١. درجات حرارة تتجاوز ١٠٠ مليون درجة مئوية: تُعدّ

درجة الحرارة العالية شرطًا أساسيًا للاندماج النووي، إذ تتطلب درجات حرارة تتجاوز ١٠٠ مليون درجة مئوية. في ظل هذه الظروف، تمتلك نوى الذرات طاقة كافية للتغلب على التنافر الكهروستاتيكي بينها، مما يسمح لها بالاقتراب من بعضها والتفاعل.

٢. كثافة بلازما مناسبة: تلعب الكثافة دورًا حاسمًا في تحقيق الاندماج النووي. يجب أن تتمتع البلازما بكثافة كافية لضمان تكرار التفاعلات بين نوى الذرات. إذا كانت الكثافة منخفضة، يصبح الاندماج غير مرجح بسبب زيادة المسافات بين النوى.

٣. مدة حصر كافية (معيار لوسون): يشير معيار لوسون إلى مدة الحصر اللازمة للبلازما للحفاظ على الحرارة والكثافة الكافيتين للاندماج. يتطلب هذا الشرط بقاء البلازما في حالة مناسبة لفترة كافية لتعزيز فرص حدوث التفاعلات. يشير وقت الحصر إلى المدة الزمنية التي تبقى فيها الجسيمات داخل حيز معين قبل أن تفقد طاقتها.

٢.٣. تحديات التحكم في البلازما

تكمن تحديات التحكم بالبلازما في مفاعلات الاندماج، لا سيما في التصاميم صغيرة الحجم، في إبقاء البلازما بعيدة عن جدران المفاعل. فيما يلي تفاصيل التحديات والحلول المقترحة:

التحديات:

- درجة الحرارة العالية: يجب الحفاظ على البلازما عند درجات حرارة عالية للغاية (أكثر من ١٠٠ مليون درجة مئوية) لتحقيق الاندماج النووي.
- الاحتواء: إبقاء البلازما محصورة ضمن حيز محدد لفترة كافية لحدوث الاندماج. البلازما مادة غير منتظمة وغير مستقرة.
- منع التلامس: منع البلازما من ملامسة جدران المفاعل، لأن ذلك قد يُلحق الضرر بالجدران ويُبرد البلازما، مما يُوقف التفاعل.
- التحكم بالشوائب: التحكم في دخول الشوائب إلى البلازما، لأنها قد تُبردها وتُقلل من كفاءة التفاعل.
- الحجم: تحقيق هذه الشروط في المفاعلات الصغيرة أكثر صعوبة منه في المفاعلات الكبيرة.

الحلول:

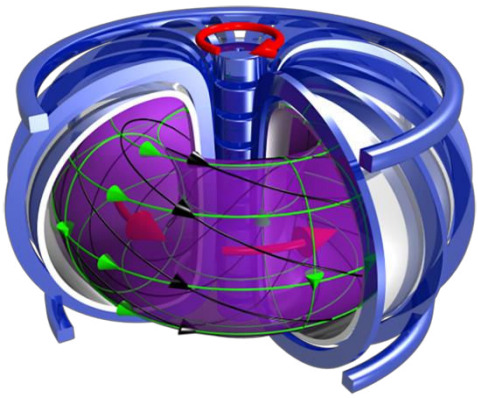
مغناطيس قوي: استخدام مجالات مغناطيسية قوية لاحتواء البلازما ومنعها من ملامسة الجدران.

يوجد نوعان رئيسيان من تصميمات المفاعلات التي تستخدم الاحتواء المغناطيسي:

- التوكاماك: تصميم يعتمد على شكل حلقة وملفات مغناطيسية تحيط بالمفاعل.
- ستيلار: تصميم مشابه للتوكاماك، ولكنه يستخدم مغناطيسات أكثر تطورًا لتوليد مجال مغناطيسي أكثر استقرارًا.
- الليزر: استخدام الليزر لتسخين البلازما وضغطها.
- التحكم بالذكاء الاصطناعي: استخدام أنظمة الذكاء الاصطناعي للتحكم بدقة في البلازما والحفاظ على استقرارها.
- تصميمات المفاعلات المبتكرة: تطوير تصميمات جديدة للمفاعلات تهدف إلى تحسين الاحتواء وتقليل حجم المفاعل.
- المواد المتقدمة: تطوير مواد جديدة لجدران المفاعل قادرة على تحمل الظروف القاسية في الداخل.

٣. تقنيات المفاعلات الاندماجية المدمجة

٣.١. الاحتواء المغناطيسي المصغر



تشمل تقنيات الاحتواء المغناطيسي المصغر مجموعة متنوعة من التصاميم المبتكرة التي تهدف إلى تحسين كفاءة احتواء البلازما وتقليل حجم المفاعل.

- التوكاماك المدمج: من السمات الرئيسية للتوكاماك المدمج تصميمه الحلقي، الذي يستخدم مجالات مغناطيسية قوية لاحتواء البلازما. يهدف هذا التصميم إلى زيادة كثافة البلازما وتقليل فقد الطاقة، مما يؤدي إلى تحسين الاستقرار وتقليل حجم المفاعل مقارنةً بالنماذج التقليدية.
- الستيلاراتور المصغر: يتميز هذا النوع من التصميم بقدرته على احتواء البلازما باستخدام مجالات مغناطيسية معقدة. توفر الستيلاراتورات المصغرة استقرارًا أكبر على المدى الطويل، مما يجعلها خيارًا جذابًا لتجنب بعض المشكلات المرتبطة بالتصاميم التقليدية التي تتطلب تيارات كهربائية عالية.
- التكوين ذو المجال المعكوس (FRC): يُعد التكوين ذو المجال المعكوس خيارًا بسيطًا وفعالًا يعتمد على إنشاء مجال مغناطيسي معكوس. يسمح هذا التصميم باحتواء فعال للبلازما في حجم صغير، ويتميز بسهولة تشغيله وصيانته.

٣.٢. الحصر بالقصور الذاتي منخفض الكتلة

يُعدّ الحصر بالقصور الذاتي منخفض الكتلة (LMC) نهجًا حديثًا نسبيًا في مجال الاندماج النووي. يعتمد هذا النهج على استخدام أنظمة ليزر أو نبضات كهرومغناطيسية مصغّرة لتحقيق الاندماج في بيئات الفضاء. وتعتمد هذه التقنية على توجيه طاقة عالية نحو وقود الاندماج، مما يُهيّئ ظروفًا مثالية من حيث الضغط ودرجة الحرارة للتفاعلات النووية. تتميز هذه الأنظمة بكفاءتها في الفضاء نظرًا لخفة وزنها وإمكانية استخدامها في بيئات نائية. لذا، فإن القدرة على تحقيق الاندماج في الفضاء تفتح المجال أمام استخدام طاقة الاندماج في مهمات فضائية طويلة الأمد، مثل الرحلات إلى المريخ أو حتى إلى مجرات بعيدة.

يهدف الحصر بالقصور الذاتي إلى استخدام طاقة عالية لتوليد البلازما اللازمة للاندماج النووي. تعتمد هذه التقنية على طرق مثل:

الليزر:

تُستخدم أنظمة الليزر الحديثة لتوليد نبضات مكثفة مُركّزة على نقطة أو صفيحة محددة. تُوجَّه هذه الطاقة نحو الوقود النووي لإحداث ظروف ضغط ودرجة حرارة قصوى تؤدي إلى تجاوز عتبة الاندماج.

النبضات الكهرومغناطيسية:

تُستخدم نبضات مكثفة من المجالات الكهرومغناطيسية لتسريع الجسيمات داخل البلازما. يمكن تصغير هذه الأنظمة، وهي مناسبة للتطبيقات الفضائية حيث المساحة محدودة. ٣.٨ مقارنة التقنيات من منظور فضائي

عند تقييم التقنيات المختلفة من منظور فضائي، تُعد المعايير التالية أساسية:

الكتلة:

التوكاماك: كثافة كتلة عالية نظرًا لتعقيد التصميم وحجم المغناطيسات المطلوبة.

الستيلاراتور: حجم وكتلة أكبر، ولكنه يوفر استقرارًا أكبر.

مفاعل FRC: يتميز بكتلة محدودة، مما يجعله مناسبًا للتطبيقات ذات القيود الوزنية.

الليزر والمولدات النبضية: يمكن تصميمها لتكون خفيفة الوزن نسبيًا، مما يقلل الوزن الإجمالي.

الكفاءة:

التوكاماك: كفاءة احتواء عالية، ولكنه يتطلب طاقة كبيرة.

ستيلاراتور: يعمل بكفاءة جيدة، لكنه يتطلب طاقة أكبر نظرًا لتصميمه المعقد.

مفاعل FRC: يحقق كفاءة احتواء معقولة، ولكنه أقل استقرارًا في بعض الحالات.

الليزر: يمكن أن يحقق كفاءة عالية على نطاق صغير، ولكنه يحتاج إلى تحسينات.

التعقيد الهندسي:

توكاماك: تصميمه المعقد يجعل التصنيع والتشغيل صعبين.

ستيلاراتور: يتميز بتعقيد عالٍ بسبب ترتيب المغناطيس، مما يزيد من تحديات البناء.

مفاعل FRC: تصميمه البسيط يسهل البناء والتشغيل. الليزر والنبضات: يمكن أن يكون تصميمها أقل تعقيدًا، لكنها تتطلب تقنية متقدمة لتحقيق نتائج فعالة.

الموثوقية على المدى الطويل:

توكاماك: يمكن أن يكون موثوقًا، ولكنه يتطلب صيانة دورية.

ستيلاراتور: يعتمد على استقرار التصميم، ويمكن أن يكون موثوقًا لفترات طويلة.

مفاعل FRC: يحتاج إلى تحسينات ليكون أكثر موثوقية على المدى الطويل.

أنظمة الليزر: قد تواجه تحديات في الموثوقية بسبب أعطال المعدات الناتجة عن الظروف الجوية أو الفضائية.

٤. متطلبات التصميم للتطبيقات الفضائية

تُعدّ البيئة الفضائية من أكثر البيئات الهندسية تطلبًا، إذ تفرض قيودًا صارمة على الكتلة والحجم والسلامة والموثوقية على المدى الطويل. ويتطلب تصميم مفاعل اندماج نووي صغير متنقل للتطبيقات الفضائية مراعاة مجموعة من المتطلبات الخاصة التي تميزه عن المفاعلات الأرضية التقليدية. يهدف هذا الفصل إلى تحليل هذه المتطلبات بالتفصيل، مع تسليط الضوء على آثارها المباشرة على فلسفة التصميم المقترحة.

٤.١. قيود الكتلة والحجم

تُعدّ الكتلة والحجم من أهم العوامل في أي نظام فضائي، نظرًا للعلاقة المباشرة بين كتلة الحمولة وتكلفة الإطلاق. تشير الدراسات إلى أن كل كيلوغرام إضافي يُطلق إلى مدار أرضي منخفض قد يُكلّف آلاف الدولارات، بينما ترتفع هذه التكلفة بشكل ملحوظ في مهمات القمر أو المريخ. لذلك، يجب أن يتميز مفاعل الاندماج النووي الفضائي بتصميم مضغوط للغاية مع أعلى كثافة طاقة ممكنة.

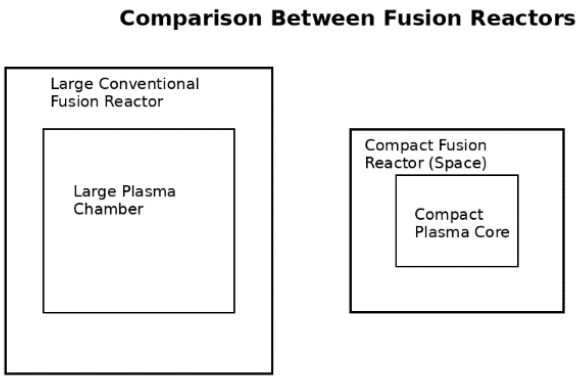
يتطلب ذلك ما يلي:

تقليل عدد المكونات غير الضرورية

دمج وظائف متعددة في وحدات واحدة (التكامل الوظيفي)

استخدام مواد خفيفة الوزن وعالية المتانة، مثل السبائك والمركبات المتقدمة

رسم تخطيطي يوضح مفاعل صغير الحجم مقارنة بحجم مفاعل تقليدي كبير

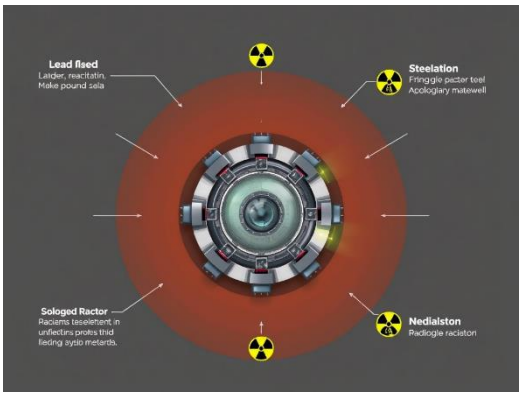


٤.٢. السلامة الإشعاعية

تُعدّ السلامة الإشعاعية أمرًا بالغ الأهمية في تصميم المفاعلات النووية. يجب أن يمتلك المفاعل أنظمة فعّالة للحماية من الإشعاع الناتج.

الحماية: تصاميم تتضمن طبقات من الحديد أو الرصاص لتعزيز الحماية.

تحليل الإشعاع: تقدير مستويات الإشعاع المحتملة أثناء تشغيل المفاعل.

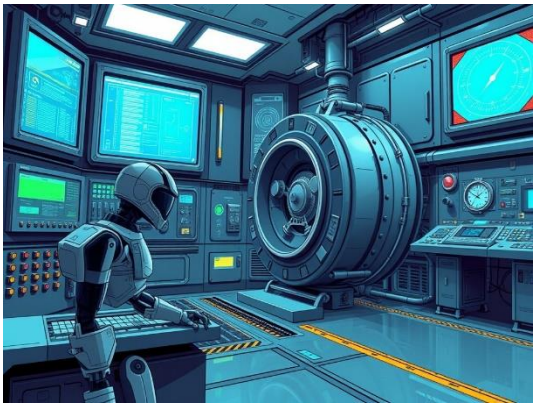


٤.٣. التشغيل المستقل والصيانة

تتطلب المفاعلات في الفضاء تشغيلًا مستقلًا لفترات طويلة، وغالبًا ما تكون صيانتها خارج نطاق التدخل البشري.

أنظمة التحكم الآلي: تصميم أنظمة قادرة على المراقبة والتشغيل دون تدخل متكرر

استخدام الروبوتات: لإجراء الصيانة الدورية.



٤.٤. مقاومة الإشعاع والاهتزازات

يجب أن تكون المفاعلات قادرة على تحمّل الإشعاع والاهتزازات الناتجة عن عمليات الإطلاق والعمليات الفضائية.

اختبارات الإجهاد: ضمان قدرة التصميم على تحمّل ظروف الاهتزاز العالية. مواد متخصصة: مثل المواد القادرة على تحمل الضغط العالي. صورة توضيحية: رسم تخطيطي يوضح اختبار إجهاد لمفاعل مزود بأجهزة تقيّم استجابته للاهتزازات.

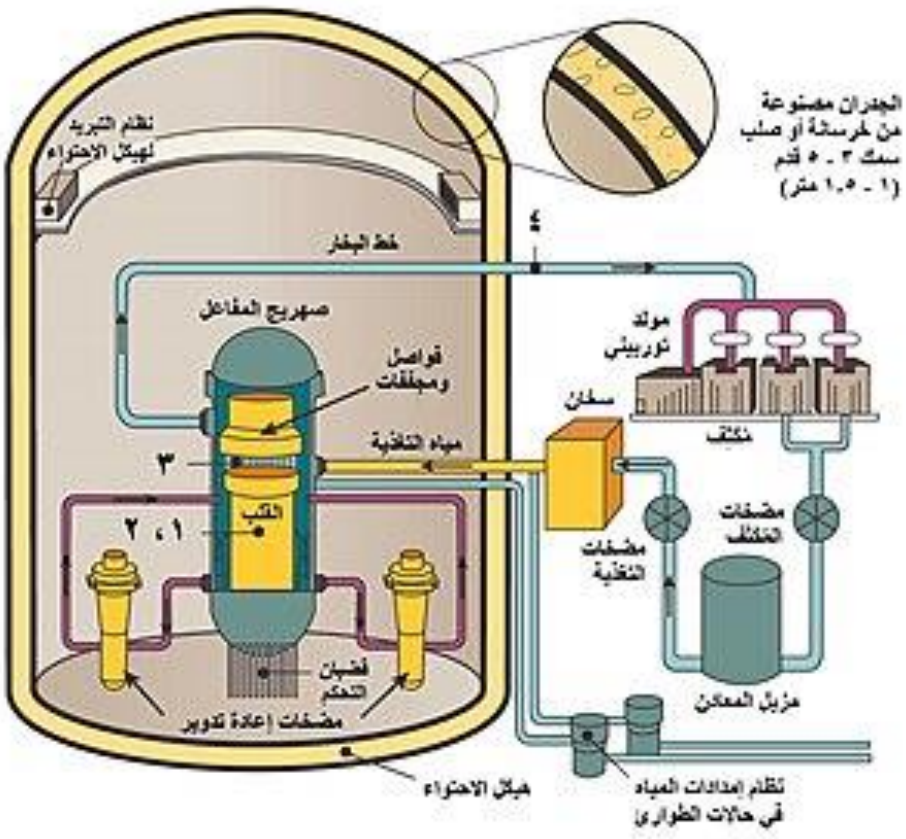
٥. التصميم الهندسي لمفاعل الاندماج النووي

٥.١. حجرة التفاعل

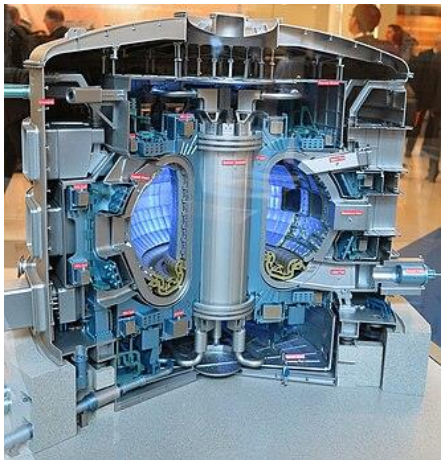
تُعدّ حجرة التفاعل العنصرَ الأهم في تصميم مفاعل الاندماج النووي. ففي هذا الحيز الحيوي تجري عمليات الاندماج النووي، مُنتجةً كميات هائلة من الطاقة النظيفة.

الأبعاد والخصائص

- الأبعاد: في التصميم الحالي، يبلغ قطر حجرة التفاعل حوالي ٣ أمتار وطولها ٦ أمتار. هذه الأبعاد مناسبة لمتطلبات التشغيل وتسمح بزيادة نشاط الاندماج.
- المواد: سيُستخدم الفولاذ المقاوم للصدأ كمادة أساسية نظرًا لخصائصه المتميزة. فهو يتميز بمقاومته العالية للتآكل وقدرته على تحمل درجات حرارة تصل إلى ١٥٠ مليون درجة مئوية.



٥.٢. هندسة الحجرة



- الهيكل: صُممت الحجرة بشكل أسطواني لتقليل الضغط الجانبي وتوزيع القوى بالتساوي.
- نظام المراقبة: يتضمن التصميم نظامًا متطورًا لمراقبة درجة الحرارة والضغط الداخليين. يضمن هذا النظام الحفاظ على الظروف المثلى، حيث تراقب أجهزة استشعار متطورة الظروف داخل الحجرة، مما يضمن أن كل شيء في حالة مثالية للاندماج النووي.

٦. كيفية عمل المفاعل النووي

المفاعل النووي نظام معقد يحول الطاقة الناتجة عن التفاعلات النووية إلى كهرباء. وهو قائم على مبادئ الفيزياء النووية والديناميكا الحرارية. في هذا الشرح، سنتناول المكونات الرئيسية وكيفية تفاعلها مع بعضها، مستخدمين الرموز والمعادلات لتوضيح الفكرة.

١. المكونات الأساسية للمفاعل

أ. الوقود النووي

الوقود: يُستخدم اليورانيوم (U-235) أو البلوتونيوم (Pu-239) في أغلب الأحيان. ويمكن تمثيله بالرمز: $U2^{35}$

ب. سائل التبريد

سائل التبريد: ينقل الحرارة، وقد يكون ماءً (H_2O) أو ثاني أكسيد الكربون (CO_2) أو مواد أخرى.

ج. قضبان التحكم

تُستخدم هذه القضبان لإبطاء أو إيقاف تفاعل الانشطار، وتحتوي على مواد مثل الكادميوم (Cd) أو البورون (B).

٢. آلية التفاعل النووي

أ. بدء التفاعل

يبدأ التفاعل بانطلاق نيوترون (n) في قلب المفاعل.

$$n + U^{235} \rightarrow U^{236} \rightarrow Ba^{141} + Kr^{92} + 3n + energy$$

يمثل هذا انشطار ذرة يورانيوم، مُنتجًا ذرات جديدة ومُطلقًا طاقة.

ب. سلسلة الانشطار

تستمر النيوترونات الناتجة في تحفيز انشطار المزيد من الذرات:

$$n + U^{235} \rightarrow U^{236} \rightarrow products + 2- 3n + energy$$

تتكرر هذه العملية بالتتابع، مُنتجةً كميات هائلة من الطاقة.

٣. انتقال الحرارة وتوليد الكهرباء

أ. انتقال الحرارة

تنتقل الحرارة الناتجة عن الانشطار إلى سائل التبريد. ويمكن تمثيل كمية الحرارة الناتجة بالمعادلة التالية:

$$Q = mc\ \Delta T$$

حيث:

Q = الطاقة الحرارية (حرارة) m = الكتلة (كجم)

c = السعة الحرارية ΔT = التغير في درجة الحرارة (كلفن)

ب. إنتاج البخار

يُستخدم البخار الناتج من سائل التبريد لتشغيل التوربينات. ويمكن حساب الطاقة الناتجة عن البخار باستخدام المعادلة التالية:

$$P = \eta \cdot Q$$

حيث: P = القدرة (واط) Q· = كفاءة النظام

٤. أنظمة الأمان

تضمن أنظمة الأمان تشغيل المفاعل في ظروف آمنة:

قضبان التحكم: تُستخدم للتحكم في التفاعل. عند إدخال قضبان المفاعل في قلب المفاعل، تمتص النيوترونات، مما يبطئ التفاعل أو يوقفه.

٥. المعادلة العامة للتفاعل النووي:

يمكن التعبير عن الطاقة المنبعثة من التفاعل النووي باستخدام معادلة أينشتاين:

$$E = mc^2$$

حيث:

E = الطاقة (جول)

m = الكتلة المفقودة (كجم)

c = سرعة الضوء في الفراغ (حوالي ٣ × ١٠٨ م/ث)

٧. أنظمة الأمان والسلامة:

٧.١. تصميم السلامة الذاتية

يُعدّ تصميم السلامة الذاتية حجر الزاوية في الهندسة النووية. تهدف هذه الفلسفة إلى جعل المفاعل أقل عرضةً للحوادث من خلال استخدام عناصر تصميم مبتكرة، تشمل ما يلي:

الهيكل الإنشائي: يعتمد هذا على تصميم هيكلي متين باستخدام مواد مقاومة للظروف القاسية.

أنظمة التحكم الذاتي: تتضمن هذه الأنظمة تصميم أنظمة ذكية تُعدّل العمليات داخل المفاعل تلقائيًا.

التنبيهات والتحكم: تتضمن أنظمة التنبيه الذاتي تنبيه المفاعل إلى أي حالات طوارئ أو تغييرات غير طبيعية في الأداء.

تقنيات الاستجابة للطوارئ

في حال حدوث عطل أو حالة طارئة، يجب وضع خطط واستراتيجيات للاستجابة الفعّالة. تشمل هذه التقنيات ما يلي:

خطط الإخلاء: تتضمن هذه الخطط تحديد مسارات طوارئ واضحة للطاقم والمستخدمين، وتحديد نقاط التجمع، وأفضل طرق الإخلاء.

الآليات الآلية: تعتمد الأنظمة على استخدام التكنولوجيا الحديثة، مثل الروبوتات، لإجراء التقييمات أو الاستجابة في حالات الطوارئ دون تعريض الأفراد للمخاطر..

التدريب: يُعد التدريب المستمر عنصرًا أساسيًا في تقنيات الاستجابة للطوارئ.

٧.٢. تخفيف الإشعاع

تُعدّ الحماية من الإشعاع جزءًا لا يتجزأ من تصميم المفاعل. توجد عدة استراتيجيات لحماية الأفراد والبيئة، منها:

- الحواجز المادية: تتضمن هذه الاستراتيجية بناء جدران سميكة حول منطقة التشغيل باستخدام مواد ذات قدرة عالية على امتصاص الإشعاع، مثل الرصاص أو الخرسانة الثقيلة.
- أنظمة مراقبة الإشعاع: تُوزع أجهزة استشعار متعددة بشكل استراتيجي حول المفاعل لمراقبة مستويات الإشعاع وتغيراتها في الوقت الفعلي.
- بروتوكولات السلامة: تُطبق إجراءات صارمة للصيانة والتفتيش على المفاعل، وفقًا لمعايير السلامة الدولية.

- التوعية والتثقيف: يجب تعزيز الوعي البيئي لدى جميع العاملين. يجب تثقيف الموظفين حول مخاطر الإشعاع وكيفية العمل بأمان، مما يُسهم في الحد من المخاطر وزيادة الكفاءة.

توليد الطاقة الحرارية والكهربائية في مفاعل اندماج نووي صغير

في الفاعل، ينشأ مبدأ جديد من المتحكم به، وينشأ معظم القوى المبعثة من القوى، ويختلف ببساطة. في تفاعل اندماج الديوتيريوم-التريتيوم(D-T) ، تحمل النيوترونات عالية الطاقة (١٤.١ ميجا إلكترون فولت) ما لعدم ٨٠% من إجمالي الطاقة، بينما تُنقل النسبة المتبقية ٢٠% بواسطة جسيمات فولفو المشحونة (٣.٥ ميجا إلكترون فولت). تُحصر جسيمات فولفو داخل البلازما بواسطة المجالات المغناطيسية، حيث تُنقل طاقتها بشكل واضح إلى البلازما عبر تصادمات كولوم، مما يساهم بشكل مباشر في التباطؤ الذاتي للبلازما. وفي المقابل، تهرب نيوترونات فرانسيسكو من منطقة البلازما المحورة وتوزع طاقتها على شكل درع في الدرعية نظرا لعمق اختراقها الأكبر.

موازنة الطاقة البديلة

يمكن كتابة نظرية التأسيس الأساسي على النحو التالي:

$$He(3.5\ \mathrm{MeV})\ ^4 + n(14.1\ \mathrm{MeV}) \rightarrow\ D + T$$

تُحسب القدرة الحرارية الكلية المتولدة داخل حجم المفاعل بالمعادلة التالية:

$$n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_f V = {}_{th}P$$

حيث:

nD و nT هما كثافتا عدد ذرات الديوتيريوم والتريتيوم على التوالي

$\langle \sigma v \rangle$ هي تفاعلية الاندماج النووي

E_f هي الطاقة المنبعثة لكل تفاعل اندماج نووي

V هو حجم البلازما

نظراً لصغر حجم المفاعل المقترح، يتم امتصاص معظم طاقة النيوترونات محلياً داخل طبقات الغطاء والدرع، مما يضمن كفاءة عالية في استغلال الطاقة الحرارية.

نظام إزالة الحرارة والتبريد

يجب إزالة الطاقة الحرارية المتولدة بكفاءة عالية لمنع حدوث أضرار هيكلية ولتمكين إنتاج الكهرباء. يُعتبر غاز الهيليوم مُبرِّدًا مثاليًا لمفاعلات الاندماج المدمجة نظرًا لما يلي:

خموله الكيميائي

انخفاض مقطع امتصاص النيوترونات

استقراره الحراري العالي عند درجات الحرارة المرتفعة

يتدفق مُبرِّد الهيليوم عبر قنوات تبريد مُدمجة تُحيط بغرفة الاندماج والغطاء، مُستخلصًا الطاقة الحرارية المُترسبة من نيوترونات الاندماج.

معلمات نظام التبريد

الجدول: المعلمات الرئيسية لنظام تبريد الهيليوم

Value	المعلمة
Helium gas	سائل التبريد
350 °C	درجة حرارة المدخل
1100 °C	درجة حرارة المخرج
1.2 MPa	ضغط النظام
10 mm	قطر القناة
70 m/s	سرعة الهيليوم
ODS ferritic steel	المادة الهيكلية

يتكون نظام التبريد من أنابيب فولاذية ODS مرتبة حلزونيًا تحيط بغرفة الاندماج لزيادة مساحة نقل الحرارة إلى أقصى حد مع الحفاظ على صغر الحجم.

تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية

في محطات الطاقة النووية التقليدية، تُحوّل الطاقة الحرارية إلى كهرباء باستخدام توربينات بخارية. إلا أنه نظرًا لصغر حجم مفاعل الاندماج المقترح وسهولة نقله، فإن دورات الطاقة البخارية غير عملية.

بدلاً من ذلك، تُدرس تقنيات التحويل المباشر المتقدمة، بما في ذلك:

المولدات الكهروحرارية(TEGs)

أنظمة الخلايا الكهروضوئية الحرارية(TPV)

تتيح هذه التقنيات التحويل المباشر للإشعاع الحراري عالي الحرارة إلى كهرباء، بكفاءة تتراوح بين ٣٥ و٤٥% تقريبًا، اعتمادًا على درجة حرارة التشغيل وخصائص المواد.

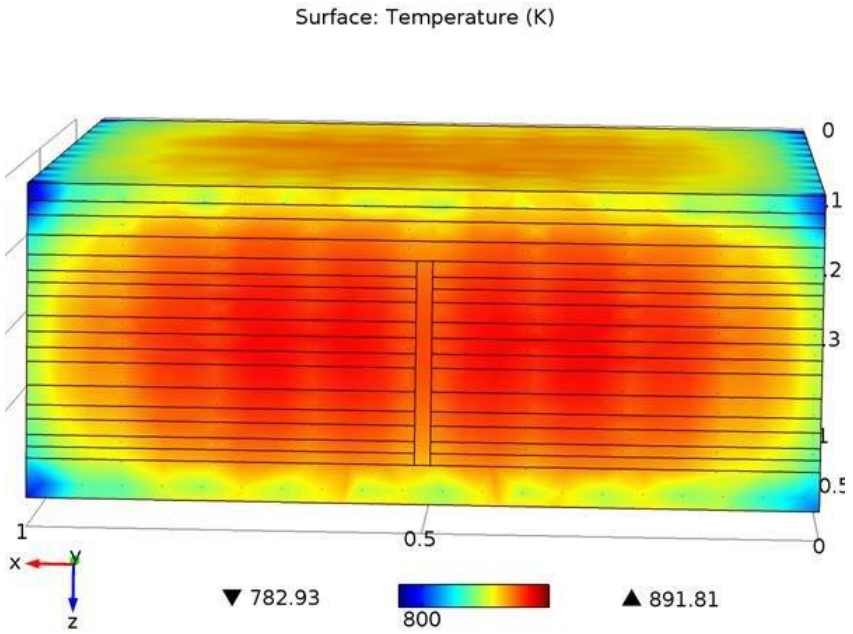
يُحسب ناتج الطاقة الكهربائية كما يلي:

$$P_{el} = \eta_{th} P$$

حيث η تمثل كفاءة التحويل.

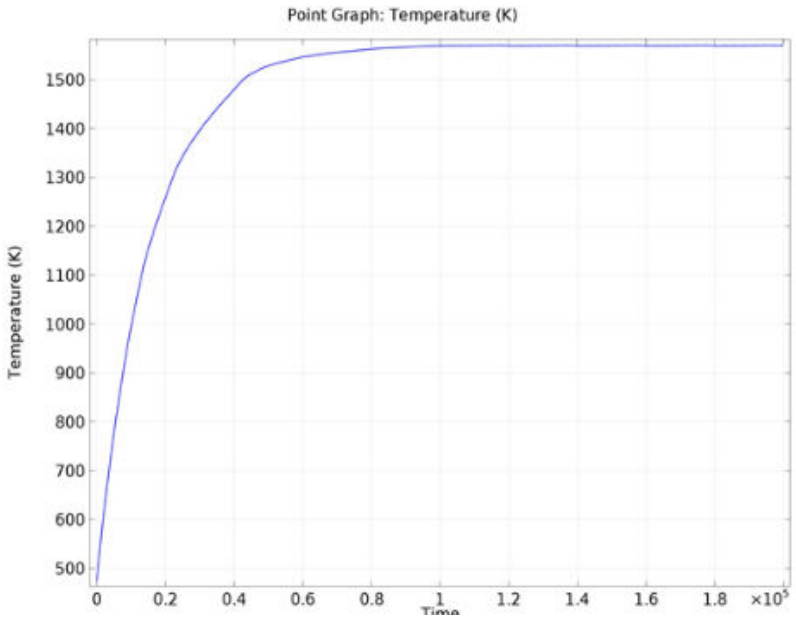
مناقشة أداء النظام

تشير المحاكاة العددية باستخدام أدوات نمذجة الفيزياء المتعددة) مثل COMSOL Multiphysics) إلى استقرار درجة حرارة المفاعل بعد مرحلة انتقالية أولية، مما يؤكد التشغيل المستقر لنظام التبريد. يتميز مفاعل الاندماج المدمج بقدرته على إنتاج طاقة كهربائية مستمرة تكفي لأنظمة المركبات الفضائية، والقواعد الكوكبية، أو وحدات الدفع عالية الطاقة



محاكاة درجة حرارة مدخل/مخرج الهيليوم

إن الجمع بين كثافة الطاقة العالية، والتصميم المدمج، والتحويل الحراري إلى كهربائي بكفاءة عالية، يجعل من هذا المفهوم للمفاعل مرشحًا واعدًا لأنظمة الطاقة الفضائية المستقبلية.



Variation of temperature versus time

النتائج والمناقشة

الطاقة الحرارية والكهربائية المتولدة لمجموعة من تصاميم المفاعلات الاندماجية الصغيرة:

رقم النموذج	شدة المجال المغناطيسي (تسلا)	كثافة البلازما (١٠²⁰ م⁻³)	زمن لحبس (ثانية)	طاقة الاندماج (ميغاجول/نبضة)	الطاقة الحرارية (ميغاجول/نبضة)	الطاقة الكهربائية (ميغاجول/نبضة)
CF-1	5.0	1.2	0.15	2.8	2.5	1.0
CF-2	6.0	1.5	0.18	3.6	3.2	1.3
CF-3	7.0	1.8	0.20	4.5	4.0	1.6
CF-4	8.0	2.0	0.22	5.4	4.8	1.9
CF-5	9.0	2.3	0.25	6.8	6.1	2.4
…	…	…	…	…	…	…
CF-16	12.0	3.0	0.30	9.5	8.6	3.4

ملاحظة:

تم حساب الطاقة الكهربائية بافتراض كفاءة تحويل حراري-كهربائي تبلغ حوالي ٤٠%.

نتائج المحاكاة العددية والتحسين

تم تحليل جميع النماذج باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics لمحاكاة السلوك الحراري والميكانيكي للمفاعل، بالإضافة إلى نماذج مبسطة لسلوك البلازما بناءً على معادلات توازن طاقة الاندماج. تم تحسين معايير التشغيل لكل نموذج لزيادة طاقة الاندماج إلى أقصى حد مع الحفاظ على حدود السلامة الهندسية.

أظهرت النتائج أن جميع النماذج تعمل ضمن نظام تشغيل آمن وغير مستدام ذاتيًا، حيث لا يحدث اشتعال تلقائي للبلازما، وأي اضطراب في ظروف الحصر يوقف التفاعل فورًا. يؤكد هذا سلامة مفاعل الاندماج مقارنةً بمفاعلات الانشطار التي تعتمد على التفاعلات المتسلسلة.

تحليل الطاقة الحرارية والكهربائية

تشير نتائج المحاكاة إلى أن معظم طاقة الاندماج تتحول إلى حرارة داخل بطانة المفاعل والهياكل المحيطة بحجرة البلازما نتيجة امتصاص النيوترونات عالية الطاقة. بفضل التصميم المُدمج، يتم امتصاص معظم هذه الطاقة محليًا، مما يقلل من فقد الحرارة ويزيد الكفاءة. في النماذج عالية الأداء، مثلCF-16 ، يُمكن توليد ما يقارب ٣.٤ ميغا جول من الطاقة الكهربائية لكل نبضة. عند تشغيل المفاعل بترددات نبضية تتراوح بين ١٠ و١٥ هرتز، يُمكن للنظام إنتاج طاقة كهربائية مستمرة تتراوح بين ٠.٥ و١ ميغاواط، وهي كافية لتلبية احتياجات المركبات الفضائية المتقدمة أو القواعد الكوكبية.

تُشير النتائج إلى أن حوالي ٦٠% من الطاقة الكهربائية المُولدة يُعاد استخدامها لتشغيل نظام الحصر المغناطيسي، وتسخين البلازما، والأنظمة المساعدة، بينما تُمثل النسبة المتبقية صافي الطاقة المُتاحة للاستخدام الخارجي.

الاستقرار التشغيلي والسلامة

أظهرت المحاكاة الحرارية أن درجة حرارة المفاعل تصل إلى حالة استقرار بعد فترة انتقالية قصيرة، مما يُشير إلى كفاءة نظام التبريد القائم على الهيليوم. لم تُسجل أي حالات ارتفاع غير مُتحكم فيه في درجة الحرارة أو إجهاد زائد للمواد أثناء التشغيل المُطوّل.

علاوة على ذلك، فإن غياب حالة حرجة وعدم إنتاج نفايات مشعة طويلة الأمد يعزز موثوقية هذا النوع من المفاعلات وسلامته في التطبيقات الفضائية. مناقشة النتائج

تؤكد النتائج أن مفاعلات الاندماج الصغيرة قادرة على تحقيق توازن فعال بين صغر الحجم وكفاءة الطاقة والسلامة العالية. وعلى عكس مفاعلات الاندماج الكبيرة المصممة لإنتاج كميات هائلة من الطاقة للشبكة الكهربائية، تركز هذه التصاميم على تلبية متطلبات الاستقلالية والموثوقية في بيئات معزولة كالفضاء.

تشير هذه الخصائص إلى أن مفاعلات الاندماج المدمجة تمثل خيارًا واعدًا للتطبيقات الفضائية المستقبلية، لا سيما في المهمات طويلة الأمد التي تتطلب مصادر طاقة مستمرة وعالية الكثافة.

يوضح التحليل أن مفاعلات الاندماج المدمجة قادرة على توفير طاقة حرارية وكهربائية موثوقة دون الاقتراب من حالة الحرج أو حالة الهروب النووي. وعلى عكس الأنظمة القائمة على الانشطار النووي، يحافظ مفاعل الاندماج بطبيعته على خصائص الأمان السلبي. ومع استمرار التقدم في حصر البلازما، والمواد، والتحويل المباشر للطاقة، يمكن أن تصبح هذه الأنظمة مصادر طاقة فعالة لمهام الفضاء طويلة الأمد.

الخاتمة

يسلط هذا البحث الضوء على تصميم مفاعل اندماج نووي صغير الحجم وقابل للنقل، مع التركيز على التقنيات والأساليب الحديثة المستخدمة لتحقيق هذا الهدف. وقد استعرضنا مجموعة من التقنيات الرئيسية، مثل الحصر المغناطيسي والحصر بالقصور الذاتي، وناقشنا مزاياها وتحدياتها، لاسيما في سياق التطبيقات الفضائية.

تمثل مفاعلات الاندماج الصغيرة خطوة مبتكرة نحو تحقيق طاقة نظيفة ومستدامة، مما يمهد الطريق لأمن الطاقة في المستقبل. يوفر استخدام التقنيات المتقدمة، مثل التوكاماك والستيلاراتور والتكوينات ذات المجال المعكوس، إلى جانب أنظمة الليزر والنبضات الكهرومغناطيسية، إمكانات كبيرة لتشغيل مهمات فضائية طويلة الأمد.

ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات تقنية وهندسية بحاجة إلى معالجة، بما في ذلك تحسين موثوقية النظام، وتقليل الكتلة، وزيادة الكفاءة. لذلك، يُعد الاستثمار المستمر في البحث والتطوير، إلى جانب التعاون الدولي في قطاع الطاقة النووية، أمرًا ضروريًا.

ختاماً، فإن مستقبل مفاعلات الاندماج الصغيرة يحمل آفاقًا واعدة، ليس فقط للتطبيقات الفضائية، بل أيضًا لمعالجة أزمات الطاقة العالمية. إن السعي لتحقيق هذه الأهداف يتطلب الابتكار المستمر والتفاني في العمل، مما سيمكننا من بناء مستقبل أكثر استدامة وأمانًا.

المراجع:

1. Algonck, M. S. (2012). Space Nuclear Power Systems. Springer.
2. Algonck, M. S., and Tournier, J. M. (2014). Nuclear Systems for Space Applications. Advances in Nuclear Energy, 72, 87-100. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.11.005

3. Chen, F. F. (2016). Introduction to Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion (3rd ed.). Springer.
4. Friedberg, J. B. (2007). Plasma Physics and Fusion Energy. Cambridge University Press.
5. ITER Project. (2018). Technical Foundations of the ITER Project. ITER.
6. Kamash, T. (1995). Physics of Fusion Reactors. Ann Arbor Science Publishers.
7. NASA. (2020). Nuclear Energy Assessment Study for Space Exploration. NASA Technical Report Server.
8. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). Final Report of the Commission on the Strategic Plan for Burning Plasma Research in the United States. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25331
9. Post, R. F. (1987). Magnetic Mirrors and Plasma Confinement. Nuclear Fusion, 27(10), 1579-1600. https://doi.org/10.1088/0029-5515/27/10/001
10. Suromons, R., Creelly, A. J., Greenwald, M., et al. (2021). SPARK: A Small-Scale, High-Field Nuclear Fusion Device. Journal of Plasma Physics, 87(1), 865870401. https://doi.org/10.1017/S0022377821000082
11. United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations.
12. Wesson, J. (2011). The Tokamak (4th ed.). Oxford University Press.