مفاعلات القدرة النووية السريعة

Abstract

The world's reserves of U^{235} are not adequate to support indefinitely the needs of a growing nuclear power industry based only on the reactors which burn the U^{235}. U^{238} and thorium exist with large depositions in the nature. Therefore, it is possible to use U^{238} and thorium to solve this problem through developing the Fast Breeder Reactors to supply electrical energy for hundreds of years. There are four types of Fast Breeder Reactors, which are: Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor (LMFBR), Gas Cooled Fast Breeder Reactor (GCFR) , Molten Salt Breeder Reactor (MSBR), Light-Water Breeder Reactor (LWBR).

مقدمـــــة

إن احتياطي العالم من U^{235} غير كافٍ لتلبية متطلباته المتزايدة من الطاقة الكهربائية النووية التي تعتمد على مفاعلات حرق U^{235}. يتواجد U^{238} والثوريوم بكميات كبيرة في الطبيعة. فيمكن استخدام U^{238} والثوريوم في المفاعلات الولودة (The Breeder Reactors) للتخلص من هذه المشكلة وتزويد العالم بالطاقة الكهربائية لمئات السنين القادمة. يوجد أربعة أنواع من المفاعلات الولودة السريعة هي :

المفاعل الولود السريع المبرد بالمعدن السائل (Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor, LMFBR).

المفاعل الولود السريع المبرد بالغاز (Gas Cooled Fast Breeder Reactor, GCFBR).

المفاعل الولود الذي يستخدم الملح المنصهر (Molten Salt Breeder Reactor, MSBR).

المفاعل الولود الذي يستخدم الماء العادي (Light-Water Breeder Reactor, LWBR).

1 ــ المفاعلات الولودة السريعة المبردة بالمعدن السائل (LMFBR)

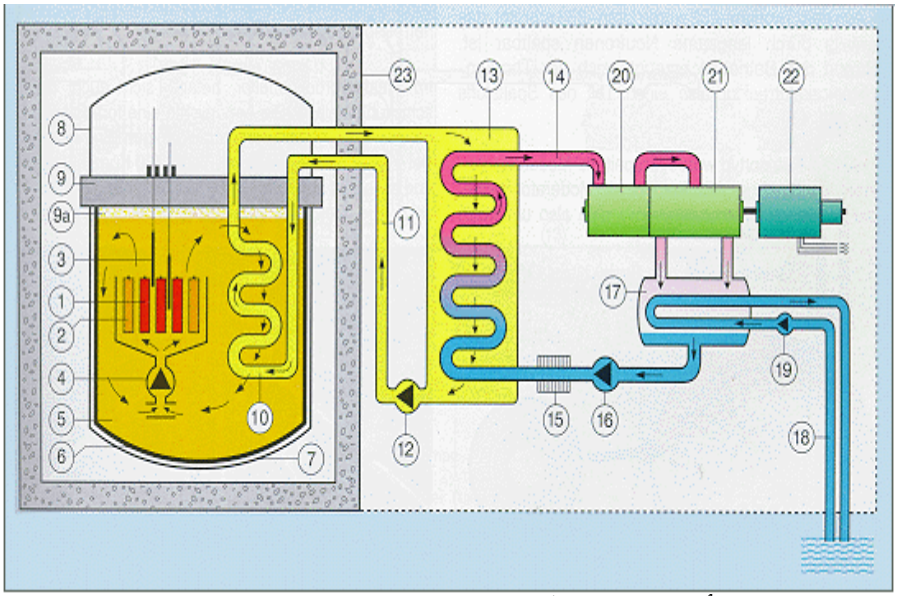
اكتشفت المبادئ الأساسية للمفاعلات الولودة السريعة قبل نهاية الحرب العالمية الثانية. كما لوحظت قدرة هذه المفاعلات كمصدر مستقبلي للطاقة منذ ذلك الوقت. بُني أول مفاعل ولود تجريبي في الولايات المتحدة الأمريكية في ولاية نيومكسيكو بطاقة قدرها 25 كيلوواط ووصل إلى الحرجية في عام 1946. لقد استخدم في هذا المفاعل البلوتونيوم كوقود نووي والزئبق كمعدن مبرد. كما بُني مفاعل آخر بطاقة قدرها 1.3 ميغاواط واستخدم فيه مزيج من الصوديوم والبوتاسيوم كمبرد ووصل إلى الحرجية عام 1951 في مختبر أرغون القومي في ولاية أيداهو بالولايات المتحدة أيضاً. استطاع هذا المفاعل التجريبي توليد بخار في الدارة الثانوية وتشغيل عنفات وتوليد طاقة كهربائية قدرها 200 كيلوواط، وكان بذلك المفاعل الولود الأول الذي يولّد طاقة كهربائية. يوجد الآن العديد من هذه المفاعلات الولودة السريعة المبردة بالمعدن السائل التي تستخدم تجارياً لتوليد الطاقة الكهربائية في العالم.

تستخدم مفاعلات LMFBR وقوداً نووياً مؤلفاً من البلوتونيوم واليورانيوم. يوضع البلوتونيوم في قلب المفاعل في حين يوضع اليورانيوم الطبيعي أو اليورانيوم المستنفد على شكل بطانة تحيط بالقلب. يتزايد عدد النترونات المتولدة من كل امتصاص في البلوتونيوم، بتزايد الطاقة. وبالتالي تتزايد نسبة التوليد بتزايد طاقة النترون المسبب للانشطار في المفاعل. لذلك، يجب أن تبذل كل الجهود في المفاعلات الولودة لمنع النترونات من التهدئة ولا يسمح للنترونات بأن تخسر من طاقتها الحركية بتفاعل

التبعثر المرن مع الهيدروجين أو الذرات الخفيفة. لذلك، لا تحتوي المفاعلات الولودة على مهدئ ويحتوي القلب والبطانة على قضبان وقود ومبرد فقط.

يستخدم الصوديوم كمبرد في مفاعلات LMFBR حيث لا يُهدئ الصوديوم (كتلته الذرية 23 غرام) النترونات نتيجة تفاعلات التبعثر المرن أو اللاّمرن. كما يُعد الصوديوم ناقلاً جيداً للحرارة وبالتالي يمكن أن تُشغّل المفاعلات الولودة بكثافة طاقية عالية. وتكون المفاعلات الولودة بحجم صغير نسبياً. وتبلغ درجة حرارة غليان الصوديوم 882°م تحت الضغط الجوي النظامي. وتشغل دارات التبريد بهذه الحرارة المرتفعة تحت الضغط الجوي النظامي. وبالنتيجة، لا تحتاج هذه المفاعلات إلى وعاء مفاعل يتحمل الضغوط العالية. تزيد درجة حرارة الصوديوم المرتفعة كمية البخار المتولد في الدارة الثانوية وبالتالي تزيد من فعالية المفاعل ككل. لا يتفاعل الصوديوم مع الوقود ومع وعاء المفاعل بتفاعل تآكل وأكسدة، ولا توجد في هذه المفاعلات مشكلة التآكل التي توجد في مفاعلات الماء الخفيف. تبلغ درجة حرارة انصهار الصوديوم 98°م وهي أعلى من درجة حرارة الغرفة. يتوجب، لجعل الصوديوم المتوضع في دارات التبريد في المفاعل بحالة سائلة، تسخين الصوديوم بشكل مستمر لمنع تحول الصوديوم إلى حالته الصلبة. يعتبر الصوديوم نشطاً كيميائياً، حيث يتفاعل بشدة مع الماء ويحترق عندما يتعرض للهواء مصدراً سحاباً أبيض من أكسيد الصوديوم. لذلك، يمكن أن يدل السحاب الأبيض الناتج من دارات التبريد على مكان التسرب أو التصدع في تلك الدارة. تغلق أجهزة المفاعلات الولودة بإحكام جيد ولا تطلق أشعة إلى البيئة المحيطة بالكمية التي تطلقها مفاعلات الماء العادي. يمتص الصوديوم النترونات ويشكل Na^{24}. يتفكك Na^{24} بعمر نصف قدره 15 ساعة ويصدر جسيم بيتا. لذلك، يصبح الصوديوم مشعاً عندما يمر في قلب المفاعل. لا يؤخذ الصوديوم في هذه المفاعلات إلى مولدات البخار مباشرة لأنه قد يُحدث تشققاً في مولد البخار ودخول الماء إلى الصوديوم المشع ويحدث تفاعل انفجاري يؤدي إلى تلوث إشعاعي. لذلك، تستخدم مفاعلات LMFBR دارتين من الصوديوم. تحتوي الدارة الأولية على الصوديوم المشع وتحتوي الدارة المتوسطة على الصوديوم غير المشع. تنقل الدارة المتوسطة الحرارة من الدارة الأولية إلى مولد البخار.

يلاحظ في الشكل (1) مخطط لمفاعل LMFBR. يتوضع قلب المفاعل وبطانة المفاعل داخل وعاء المفاعل الذي لا يحتاج أن تكون جدرانه سميكة لتحمل الضغوط العالية كما في مفاعلات الماء العادي. يحاط وعاء المفاعل بخزان إضافي لمنع تسرب الصوديوم المشع. يضم مفاعل LMFBR الذي طاقته 1000 ميغاواط كهربائي أربع دارات تبريد أولية وتتصل كل منها بدارة تبريد متوسطة وبمولد بخار مستقل. إن صوديوم الدارة الأولية هو صوديوم مشع. ويتوجب لذلك تدريع الدارة الأولية تدريعاً مناسباً باستخدام ما يسمى بالحاوية. تملأ الحاوية من الداخل بغاز الآزوت للتقليل من احتمال اشتعال الصوديوم المشع. كما يملأ الفراغ المتوضع فوق مضخات الصوديوم في الدارة الأولية بالأرغون للسبب ذاته. لا تحتاج أنابيب الدارة المتوسطة وأنابيب مولد البخار للتدريع لعدم احتوائها على الصوديوم المشع.



الشكل (1) : الأجزاء الرئيسية للمفاعل الولود السريع المبرد بالمعدن السائل

حيث : 1 ــ وقود منشطر، 2 ــ وقود ولود،3 ــ قضبان تحكم، 4 ــ مضخة صوديوم أولية، 5 ــ صوديوم مبرد في الدارة الأولية، 6 ــ وعاء المفاعل، 7 ــ وعاء للوقاية، 8 ــ غطاء المفاعل، 9 ــ غطاء، 10 ــ مبادل حراري، 11 ــ صوديوم في الدارة الثانوية، 12 ــ مضخة، 13 ــ مولد بخار، 14 ــ بخار طازج، 15 ــ سخان للماء، 16 ــ مضخة ماء، 17 ــ مكثف، 18 ــ ماء تبريد، 19 ــ مضخة ماء للتبريد، 20 ــ عنفة عالية الضغط، 21 ــ عنفة منخفضة الضغط، 22 ــ مولد.

يتألف القلب من شبكة من مجموعة الوقود. تتألف كل مجموعة وقود من عدد من قضبان الوقود حيث يبلغ قطرها 10 ـ 15 سم ويبلغ طولها 3 ـ 4 أمتار. تتوضع قضبان الوقود في المركز في حين تتوضع قضبان البطانة على محيط القلب. يبلغ قطر أنبوب الوقود المحاط بغلاف من الحديد غير القابل للصدأ 6 ـ 7 ملم ويحوي بداخله مزيجاً من أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) وأكسيد اليورانيوم (UO_2). تفصل أنابيب الوقود عن بعضها البعض باستخدام فاصل مناسب. تملأ أنابيب البطانة بأكسيد اليورانيوم فقط وتكون بقطر أكبر يصل إلى 1.5 سم.

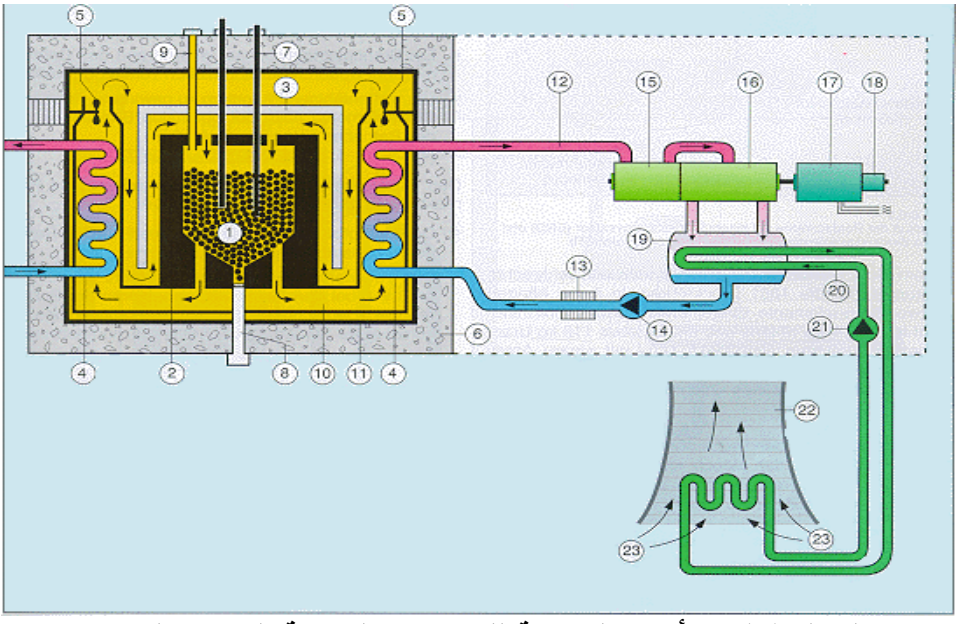
يتمتع الصوديوم بصفات نقل حراري جيدة تفوق الماء، ولذلك تكون المسافة التي تفصل بين قضبان الوقود أصغر من المسافة التي تفصل بين قضبان الوقود في مفاعلات الماء العادي. يدخل الصوديوم من أسفل القلب ويمر على قضبان الوقود والبطانة ناقلاً الحرارة المتولدة عن الانشطار عبر الدارة الأولية. تنتقل الحرارة من الدارة الأولية إلى المتوسطة ومنها إلى مولد البخار.

تستخدم مفاعلات LMFBR نوعاً آخر من الوقود هو كربون اليورانيوم وكربون البلوتونيوم، حيث يمتلك هذا الوقود نسبة توليد أكبر من نسبة التوليد للوقود PuO_2-UO_2. ترتبط في وقود كربون اليورانيوم كل ذرة كربون مع ذرة يورانيوم، في حين ترتبط كل ذرة يورانيوم مع ذرتين من الأكسجين في حالة الوقود UO_2. تساهم الزيادة في عدد ذرات الأكسجين في تهدئة النترونات، وبالتالي في زيادة عدد النترونات الحرارية وإنقاص عدد النترونات المتولدة. لذلك يعتبر الوقود الثاني أفضل من الوقود الأول. تستخدم بعض مفاعلات LMFBR وقوداً نووياً مؤلفاً من أكسيد الثوريوم وأكسيد U^{233}. يشكل U^{233} قلب المفاعل بدلاً من البلوتونيوم، ويشكل الثوريوم بطانة المفاعل بدلاً من اليورانيوم الطبيعي أو اليورانيوم المستنفد. أما قضبان التحكم في مفاعلات LMFBR فهي عبارة عن أنابيب من كربيد البورون محاطة بغلاف من الحديد غير القابل للصدأ. تصل درجة حرارة البخار في مولد البخار إلى نحو 500°م ويبلغ ضغطه 18 ميغاباسكال، ويصل مردود المحطة إلى 40% تقريباً.

2 ــ المفاعلات الولودة السريعة المبردة بالغاز (GCFBR)

تشابه هذه المفاعلات في تصميمها المفاعلات الحرارية المبردة بالغازات ذات درجات الحرارة العالية (The High Temperature Gas Reactors, HTGR). تبرد هذه المفاعلات بغاز الهليوم وتزود بوقود من أكسيد اليورانيوم وأكسيد البلوتونيوم. يضم قضيب الوقود عدداً من حبيبات الوقود ويغلف بالحديد غير القابل للصدأ.

للتذكرة بالمفاعلات المبردة بالغازات ذات درجات الحرارة العالية (HTGR) نود تقديم الشرح التالي: طورت في الولايات المتحدة الأمريكية المفاعلات الحرارية المبردة بالغازات ذات درجات الحرارة العالية (HTGR) كما في الشكل (2).



الشكل (2) : الأجزاء الرئيسية للمفاعلات الحرارية المبردة بالغازات ذات درجات الحرارة العالية (HTGR)

حيث : 1 ــ قلب المفاعل، 2 ــ عاكس من الغرافيت،3 ــ درع من الحديد، 4 ــ مولد بخار، 5 ــ محرك الغاز، 6 ــ حاوية إسمنتية، 7 ــ قضبان تحكم، 8 ــ مخرج الكرات، 9 ــ مدخل الكرات، 10 ــ غاز مبرد من الهيليوم، 11 ــ قشرة من الحديد غير القابل للصدأ، 12 ــ غاز بارد، 13 ــ سخان أولي، 14 ــ مضخة للتزود بالماء، 15 ــ عنفة عالية الضغط، 16 ــ عنفة منخفضة الضغط، 17 ــ مولد، 18 ــ مخرج، 19 ــ مكثف، 20 ــ ماء تبريد، 21 ــ مضخة، 22 ــ برج تبريد جاف، 23 ــ تدفق الهواء.

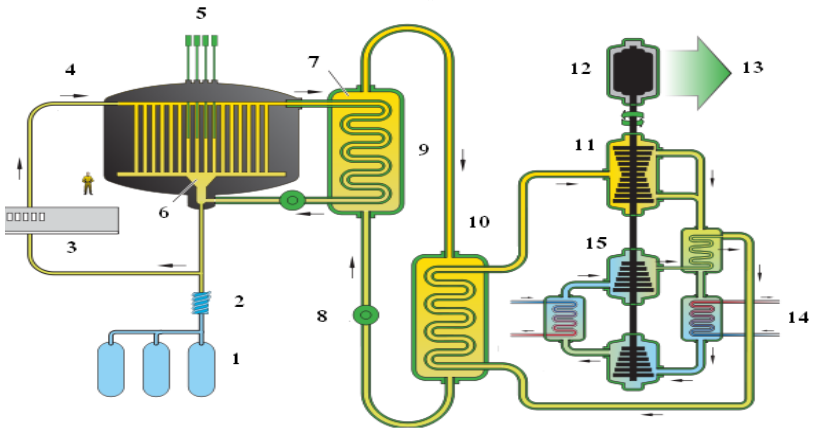
تستخدم هذه المفاعلات الغرافيت كمهدئ وغاز الهليوم كمبرد. يعتبر غاز الهليوم غازاً مناسباً للتبريد لأنه أكثر خمولاً كيميائياً من غاز ثاني أكسيد الكربون، كما أنه لا يمتص النترونات ولا يصبح مشعاً، إلا أنه يلتقط بعض الغازات المشعة المتحررة من قضبان الوقود ويصبح بذلك مشعاً. تستخدم هذه المفاعلات وقوداً من اليورانيوم عالي التخصيب والثوريوم. إن حجم هذه المفاعلات أقل من حجم المفاعلات التي تستخدم غاز ثاني أكسيد الكربون كمبرد، ونظراً لاستخدامها اليورانيوم عالي التخصيب. لذلك، فإن السعر الإجمالي للمفاعلات المبردة بالغازات ذات درجات الحرارة العالية يكون أقل من السعر الإجمالي للمفاعلات المبردة بغاز ثاني أكسيد الكربون. يتشكل الوقود في المفاعلات المبردة بالغاز ذات درجة الحرارة العالية من حبيبات صغيرة من كربون اليورانيوم والثوريوم التي تحاط بغلاف خاص لمنع تسرب نواتج الانشطار. تصب هذه الحبيبات الصغيرة بشكل قضبان وقود أسطوانية بطول 5 سم وقطر 1.3 سم باستخدام مادة كربونية رابطة مناسبة. توضع قضبان الوقود ضمن حفر في الغرافيت بطول 80 سم. يزود الغرافيت بحفر إضافية لاحتواء قضبان التحكم وتمرير الغاز. يتدفق غاز الهليوم إلى الأسفل عبر قلب المفاعل ويذهب إلى مولدات البخار ويضخ مرة ثانية إلى القلب. تغلف مكونات المفاعل بوعاء من الإسمنت المسلح. يتولد البخار عن هذا المفاعل بدرجة حرارة قدرها 540°م وضغط قدره 16 ميغاباسكال ويبلغ مردود المحطة حوالي 40%.

3 ـ المفاعلات الولودة التي تستخدم الملح المنصهر (MSBR)

تستخدم هذه المفاعلات أملاح ^{233}U والثوريوم المنصهرة، وتعتبر مفاعلات ولودة حرارية يمتزج فيها الوقود والمادة الخصبة والمبرد ويتشكل بذلك مفاعل متجانس. يتألف المزيج من الأملاح التالية : $LiF, BeF_2, ThF_4, U^{233}F_4$. يمثل الشكل (3) الأجزاء الرئيسية لمفاعل MSBR، حيث يتألف المفاعل من الكربون الذي يعمل عمل المهدئ ويكون على شكل كتل تحتوي على ثقوب لمرور الملح المنصهر. عندما يمر المزيج في القلب يصبح حرجاً ويحرر طاقة انشطارية، وتنتقل الحرارة مع المزيج خلال الدارة الأولية. تنتقل الحرارة إلى الدارة المتوسطة التي تحوي ملح تبريد منصهر ومنها إلى مولد البخار. تحتوي الدارة الأولية على جهاز يستخدم للمعالجة الكيميائية لملح

الوقود. يتحول ^{232}Th إلى ^{233}U ماراً بنواة البروتوأكتينيوم (Pa). تتفكك نواة Pa مصدرة جسيم بيتا بعمر نصف قدره 27.4 يوماً. يمتص Pa النترونات الحرارية بشدة ولذلك يخرج Pa بواسطة جهاز المعالجة الكيميائية خارج المفاعل ويخزن خارج المفاعل ليتفكك إلى ^{233}U. يفصل ^{233}U ويعاد إلى المفاعل كوقود أو يباع للاستخدام في مفاعلات أخرى. كما يستخدم جهاز المعالجة الكيميائية لفصل نواتج الانشطار غير المرغوبة والتي تمتص النترونات الحرارية بشدة. كما يمكن تزويد المفاعل بالوقود أثناء عمل المفاعل دون الحاجة إلى إيقاف المفاعل كما في المفاعلات الأخرى. تحتوي الدارة الأولية على نواتج الانشطار وبالتالي فهي شديدة النشاط الإشعاعي. لذلك يتوجب تدريع الدارة الأولية تدريعاً مناسباً لضمان سلامة العاملين في المحطة من النشاط الإشعاعي لنواتج الانشطار.

من إيجابيات هذا النوع من المفاعلات العمل عند ضغوط منخفضة حيث يقارب ضغط الملح السائل الضغط الجوي النظامي. كما يوفر الملح المنصهر الذي يتمتع بدرجة حرارة عالية بخاراً بدرجة حرارة قدرها 540°م وضغطاً قدره 24 ميغاباسكال. ويصل مردود المحطة بالتالي إلى 44% تقريباً.



الشكل (3) الأجزاء الرئيسية للمفاعل الولود الذي يستخدم الملح المنصهر

حيث : 1 ــ خزانات للوقود في حالة الطوارئ، 2 ــ مأخذ للتبريد، 3 ــ محطة معالجة كيميائية، 4 ــ ملح نقي، 5 ــ قضبان تحكم، 6 ــ وقود ملحي، 7 ــ ملح للتبريد، 8 ــ مضخة، 9 ــ مبادل حراري، 10 ــ مبادل حراري، 11 ــ عنفة، 12 ــ مولد، 13 ــ تيار كهربائي، 14 ــ مبادل حراري غازي، 15 ــ ضاغط.

4 ـ المفاعلات الولودة التي تستخدم الماء العادي (LWBR)

لقد اعتقد منذ سنوات عديدة بعدم إمكانية صنع مفاعل ولود يحتوي على الماء العادي، ولو استخدم U^{233} كوقود نووي. لأن الماء يهدئ النترونات إلى الطاقة الحرارية وبالتالي يتناقص عدد النترونات المتولدة بتناقص طاقة النترونات، وبالتالي تتناقص نسبة التوليد. كما أن الماء يمتص النترونات الحرارية بشدة. لقد حُلت هذه المشكلة بإنقاص نسبة كمية الماء في قلب المفاعل إلى كمية الوقود. تقل في هذه العملية كمية النترونات التي تتم تهدئتها ويزداد عدد النترونات السريعة وتصبح عملية التوليد ممكنة.

بنت الولايات المتحدة أول مفاعل ولود باستخدام الماء العادي في ولاية بنسلفانيا عام 1981. سيساهم الانتقال من حرق U^{235} نادر الوجود إلى حرق الثوريوم المتوفر بكثرة في الطبيعة باستخدام مكونات مفاعلات الماء العادي نفسها في حل مشكلة الوقود النووي الذي يشارف على النفاد، ويوفر على الصناعة النووية صنع مكونات جديدة للمفاعلات واستخدام مكونات المفاعلات الحالية التي تستخدم الماء العادي.

يتألف قلب المفاعل من قضبان الوقود التي تتألف من أكسيد الثوريوم ThO_2 وأكسيد اليورانيوم (UO_2^{233} 0-6%) تحاط ببطانة من ThO_2 و (UO_2^{233} 0-3%). لا تستخدم قضبان التحكم للتحكم في هذا المفاعل لأنها تمتص عدداً كبيراً من النترونات، وبالتالي تجعل عملية التوليد غير ممكنة، ويتم التحكم في هذا المفاعل عن طريق سحب وإدخال قضبان الوقود في قلب المفاعل .

د. قاسم خطاب
رئيس قسم الهندسة النووية
هيئة الطاقة الذرية السورية
kkhattb@aec.org.sy

References

(1) IAEA, fast reactor database, TECDOC 11531, 2006.

(2) IAEA, status of fast reactor research and technology, TECDOC 1691, 2013.

(3) IAEA, status of liquid metal cooled fast reactor technology, TECDOC 1083, 1999.

(4) IAEA, status of liquid metal fast breeder reactor development in the USA, TECDOC 791.1994.

(5) ISHIKAWA M. Japanese fast reactor program, 2008.