الفصل الثامن
المفاعلات النووية

مقدمة

المفاعلات النووية هي منشآت ضخمة يتم فيها السيطرة على عملية الأنشطار النووي حيث يتم الأحتفاظ بالأجواء المناسبة لأستمرار عملية الانشطار النووي دون وقوع انفجارات أثناء الانشطارات المتسلسلة. وتستخدم المفاعلات النووية لأغراض خلق الطاقة الكهربائية، وتصنيع الأسلحة النووية، وإزالة الأملاح والمعادن الأخرى من الماء للحصول على الماء النقي، وتحويل عناصر كيميائية معينة إلى عناصر أخرى، وخلق نظائر عناصر كيميائية ذات فعالية إشعاعية وأغراض أخرى.

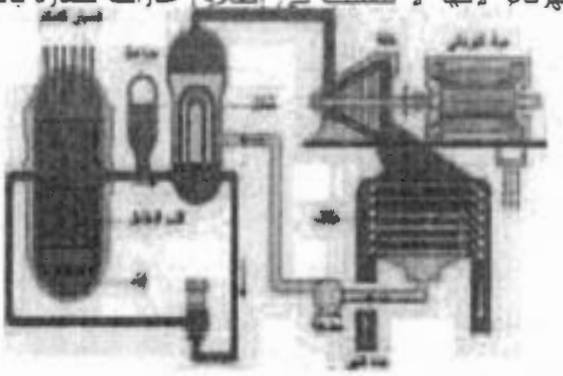
يعتبر "إنريكو فرمي" عالم الفيزياء الإيطالي الحائز علي جائزة نوبل في الفيزياء عام 1938م من أوائل من اقترحوا بناء مفاعل نووي، حيث أشرف مع زميله "ليو زيلارد" اليهودي المجري على بناء أول مفاعل نووي في العالم عام 1942م. وكان الغرض الرئيسي من هذا المفاعل هو تصنيع الأسلحة النووية.

ويتوقع بعض الخبراء نقصا حادا في الطاقة الكهربائية في المستقبل البعيد، نتيجة ظاهرة انحباس الحراري التي تسببها الأنشطة البشرية، مثل: تكرير النفط، ومحطات الطاقة، وعادم السيارات، وغيرها من الأسباب وهناك اعتقادا سائدا إن الطاقة النووية هو السبيل الأمثل لسد هذا النقص في المستقبل.

كما ذكرنا سابقا، كان "إنريكو فرمي- E.Fermi" و "ليو شيلارد- L.Szilard" أول من بنى مفاعلاً نووياً في جامعة شيكاغو في عام 1942م. ولقد استخدمت المفاعلات النووية الأولى في أربعينيات القرن العشرين الميلادي لتوليد البلوتونيوم للأسلحة النووية. ثم استخدمت مفاعلات أخرى في البحرية لتسيير الغواصات. وفي منتصف الخمسينيات من القرن العشرين أُجريت في الإتحاد السوفييتي وفي دول غربية أخرى أبحاث حول استخدام المفاعلات النووية

لأغراض غير عسكرية. وفي عام 1951م، أنتجت طاقة كهربائية لأول مرة من مولدات تعمل بالطاقة النووية. وكان أول مفاعل يولد الكهرباء لأغراض تجارية قد بني في روسيا في عام 1954م. وبدأ تشغيل أول مفاعل نووي لتوليد الكهرباء في الولايات المتحدة في عام 1957م.

وبعد أن أنشئت مئات المفاعلات في بلدان كثيرة توقف بناؤها في بعض البلدان، ومنها الولايات المتحدة (في الثمانينيات)، وكان ذلك لأسباب اقتصادية ثم أعادت النظر في ذلك في عام 2004م. ومن المؤكد أنه سوف تبنى مفاعلات نووية جديدة لتوليد الكهرباء لأنها لا تتسبب في اطلاق غازات ضارة بالبيئة.



الشكل (1)مخطط يبين مبدأ عمل محطة نووية لتوليد الكهرباء فيها مفاعل يعمل باليورانيوم المخصب والماء المضغوط

مكونات المفاعل النووي

يتكون أي مفاعل نووي من الأجزاء التالية:

1- مركز المفاعل وهو الجزء الذي يتم فيه سلسلة عمليات الانشطار النووي.

2- السائل المتحكم في حرارة المركز ويستعمل الماء عادة للتحكم في سرعة عمليات الأنشطار النووي وكواقي من الأشعاع المنبعث من العملية.

3- حاويات تحيط بمركز المفاعل و السائل المتحكم في حرارة المركز لمنع تسرب الأشعاعات الناتجة من الأنشطار النووي.

4- محولات حرارية للتحكم في حرارة السائل المتحكم في حرارة المركز.

5- مولدة كهربائية عملاقة.

وبغرض تحفيز سلسلة عمليات الأنشطار النووي في مركز المفاعل النووي يستعمل ما يسمى بالوقود النووي، والتي هي في الغالب اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم-239. والفكرة تكمن في تحفيز الانشطار في أنوية ذرات اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم-239 لإيصالهما إلى مرحلة ما يسمى الكتلة الحرجة.

ولتوضيح مفهوم الكتلة الحرجة، تصور أن هناك كرة بحجم قبضة اليد مصنوعة من مادة اليورانيوم-235 ، بعد تحفيز أولي لعملية الإنشطار النووي بواسطة تسليط حزمة من النيوترون على الكرة، سيتولد 2.5 نيترون جراء هذا الإنشطار الأول لنواة ذرة اليورانيوم-235، وهذا يكون كافيا لبدأ انشطار ثاني في كل الأجزاء المتكونة من الأنشطار الأول. وأثناء هذه السلسلة المتعاقبة من الأنشطارات في نواة الذرات يفقد الكثير من النيوترونات المتكونة إلى سطح الشكل الكروي ولكن كمية النيوترونات المتكونة في الداخل كافية لادامة عمليات الإنشطار. وهنا يأتي دور الكتلة الحرجة التي يمكن تعريفها بالحد الأدنى من كتلة مادة معينة كافية لتحمل سلسلات متعاقبة من الأنشطارات. فاذا كان العنصر المستخدم في عملية الأنشطار النووي ذو كتلة يتطلب تسليطا مستمرا بالنيوترونات لتحفيز الأنشطار الأولي للنواة فان هذه الكتلة تسمى الكتلة دون الحرجة.

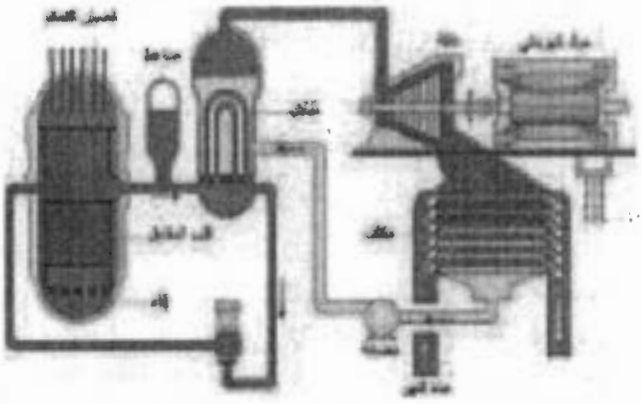
واذا كان العنصر المستخدم في عملية الإنشطار النووي ذو كتلة قادرة على تحمل سلسلات متعاقبة من الإنشطار النووي بدون أي تحفيز خارجي، بواسطة تسليط نيوترونات خارجية. ويطلق على هذه الحالة الكتلة الفوق حرجة وهي المرحلة المطلوبة لتصنيع القنبلة النووية.

وتعتبر أستراليا، وكازاخستان، وكندا، وجنوب أفريقيا، والبرازيل، وناميبيا من أكبر الدول المصدرة لليورانيوم، وتباع عادة بسعر يتراوح من 80 - 100 دولار للكيلوغرام الواحد. وبعد الحصول عليه، يتم طحنه وتحويله إلى مايسمي بالكعكة الصفراء التي يتم تحويلها فيما بعد إلى يورانيوم هيكسافلوريد uranium hexafluoride ويتم بعد ذلك عملية اخصاب اليورانيوم.

وصف المفاعل

يتألف المفاعل النووي من ثلاثة أجزاء، كما هي موضحة في الشكل التالي، وهي:

1- جزء فعّال هو قلب المفاعل reactor core
2- أجهزة تحكم وأمان.
3- حاوية محكمة تستطيع تحمل ضغوط عالية.



1- قلب المفاعل

تختلف المفاعلات عن بعضها تبعاً للعناصر الرئيسة الثلاثة التي تميز القلب وهي: أ- الوقود (fuel)، ب- المهدّئ (moderator)، ج- المبرّد (coolant) أو (المائع الحامل للحرارة).

أ - الوقود النووي

ويمكن أن يكون من اليورانيوم، وهو الأكثر استخداماً، أو من البلوتونيوم. واليورانيوم يمكن أن يكون إما بشكله الطبيعي (الذي يحتوي على 0.7 في المئة من اليورانيوم 235 وعلى 99.3 في المئة من اليورانيوم 238) أو مخصّباً (enriched) زيدت فيه نسبة اليورانيوم 235 إلى نحو 3 إلى 4 في المئة.

ويستخدم اليورانيوم الطبيعي أكثر ما يستخدم على شكل قضبان مصمتة أو مجوفة (أنابيب) من اليورانيوم المعدني، نصف قطرها عدة سنتمترات وطولها عشرات السنتمترات. أما اليورانيوم المخصّب فيستخدم عادة على شكل أكسيد اليورانيوم UO_2 بصورة أسطوانات صغيرة قطرها عدة مليمترات وارتفاعها نحو 15 مليمتر، توضع فوق بعضها في أنابيب معدنية.

يتعرض اليورانيوم المعدني للضرر بسبب الإشعاع، وهذا يقلل من عمره التشغيلي في المفاعل، إلا أنه يمكن تحسين متوسط عمره المتوقع نوعاً ما بوساطة المعالجة الحرارية، وأكثر من ذلك بإضافة عناصر أخرى إليه، مثل: الزركونيوم أو الملبدينيوم. أما أكسيد اليورانيوم فمقاومته لضرر الإشعاع أكبر، فضلاً عن أنه يقاوم التآكل في الماء. ولكن ناقليته الحرارية وكثافته أخفض من تلك التي للمعدن، وهذا يجعله أسوأ من المعدن في بعض التطبيقات.

ويحاط الوقود، لمنع تسرب نواتج الانشطار التي تتشكل فيه ولتجنب التلوث الخارجي، بغلاف محكم الإغلاق يحميه كذلك من التآكل الذي يسببه المائع الحامل للحرارة المحيط به. ويشكل هذا الغلاف كذلك دعامة ميكانيكية له. ويمكن أن يكون الغلاف من المغنسيوم أو من الفولاذ غير القابل للصدأ أو من سبيكة منالزركونيوم.

أما البلوتونيوم 239 فينتج بوساطة أسر نترون إضافي في اليورانيوم 238، وما بعد اليورانيوم فهو ناتج ثانوي في مفاعلات توليد الكهرباء النووية. وقد أنتجت اليابان وحدها، على سبيل المثال، 10 طن من البلوتونيوم نتيجة لبرنامج مفاعلاتها التجارية. لكن البلوتونيوم لا يزال، كوقود نووي تجاري، في مرحلة التجريب والاختبار في أوربا و اليابان، أما في الولايات المتحدة فقد استبعدت إلى أجل غير مسمى منذ عام 1977م عملية تدوير البلوتونيوم من الوقود المستنفد.

ب - المهدئ

لابد لاستمرار التفاعل المتسلسل من تهدئة النترونات الناتجة من التفاعل والتي تبلغ سرعتها نحو 20000 كم/ث إلى سرعة تبلغ تقريباً 2 كم/ث فقط، وتدعى عندئذ نترونات حرارية. وهذا هو دور المهدئ الذي يمكن أن يسمى أيضاً مبطّئاً.

ويتألف المهدئ من ذرات خفيفة بحيث إن النترونات التي تصطدم بنوى هذه الذرات اصطدامات مرنة متتالية، مثلها في ذلك مثل كرات البلياردو، تفقد جزءاً كبيراً من طاقتها الحركية من دون أن تؤسر. ويزداد احتمال أن يتسبب نترون في انشطار نواة من مادة الوقود ازدياداً كبيراً حين تكون سرعة هذا النترون صغيرة، ولذلك تستخدم معظم المفاعلات مهدئاً لتحويل النترونات السريعة إلى نترونات حرارية (أي بطيئة). وهذا يتيح استخدام مقادير أقل وتراكيز أصغر من المواد القابلة للانشطار. وأكثر المواد استخداماً كمهدئ هو الجرافيت والماء العادي والماء الثقيل والبريليوم أو سوائل عضوية معينة.

ج- المبرّد (أو المائع الحامل للحرارة)

إن معظم الطاقة التي يحررها انشطار الوقود النووي هي طاقة حركية، تحملها شظايا الانشطار، تتحول بدورها إلى حرارة لدى تباطئها ومن ثم توقفها. وترحَّل هذه الحرارة من قلب المفاعل إلى خارجه بوساطة مائع تحركه مضخة. وينبغي أن تتوافر في هذا المائع مجموعة من الصفات.

الصفات التي يجب توفرها في المبرد

- أن يكون مستقراً من الناحية الكيمياوية.
- ألا يأسر من النترونات إلا أقل ما يمكن.
- أن تكون سعته وناقليته الحراريتان كبيرتين لدرجة كافية.
- ألا يسبب تآكلاً إن في غلاف الوقود أو في مكونات المفاعل الأخرى.

ويمكن أن يكون هذا المائع إما غاز الكربون (كما في مفاعلات اليورانيوم الطبيعي)، أو من الصوديوم المنصهر (كما في المفاعلات السريعة الولودة)، أو من الهليوم، أو من الماء الثقيل، أو من سوائل عضوية (كما في الأنواع الأخرى من المفاعلات).

2- أجهزة التحكم والأمان

يكون المفاعل حرجاً critical حين يكون معدل إنتاج النترونات فيه مساوياً معدل امتصاصها في القلب وتسربها إلى خارجه. ويكون دون الحرج subcritical إذا كان عدد النترونات المنتجة أقل من عدد المستهلك منها، وهذا يؤدي إلى توقف التفاعل المتسلسل. ويكون فوق الحرج supercritical إذا كان عدد النترونات

المنتجة أكبر من عدد المستهلَك منها. لذلك يحتاج التحكم بالمفاعل إلى قياس الشروط الحرجة قياساً مستمراً وضبطها. ويتم التحكم بالمفاعل بوساطة ضبط التوازن بين إنتاج النترونات واستهلاكها، أي الحفاظ على التفاعل النووي المتسلسل في مستوى محدد. ويجري التحكم باستهلاك النترونات عادة بوساطة تغيير امتصاصها أو تسربها. لكن يمكن كذلك التحكم بمعدل توليد النترونات بوساطة تغيير كمية المادة القابلة للانشطار في قلب المفاعل.

ويتكون جهاز التحكم من قضبان تحكم (وأمان) control rods مصنوعة من مواد لها خاصة امتصاص النترونات (مثل: الكدميوم والبور) يجري ضبط إدخالها في قلب المفاعل ضمن شروط متحكم بها بصرامة. وينبغي أن تكون هذه القضبان مرتبة بحيث تزيد التفاعلية reactivity (أي تزيد عدد النترونات) ببطء وبتحكم جيد. كما ينبغي أن تكون قادرة على إنقاص التفاعلية إنقاصاً بطيئاً وإنقاصاً سريعاً إذا اقتضى الأمر.

ويمكن تشغيل سواقات التحكم إما آلياً أو بوساطة المشغّل. وهذه السواقات يمكن أن تكون كهرميكانيكية أو هدروليكية تسبب حركة إدخال قضبان التحكم إلى القلب وإخراجها منه. ويتيح جعل هذه القضبان تسقط بسرعة داخل القلب تحت تأثير ثقلها إيقاف المفاعل فجأة scram في حال الخطر.

3- الحاوية المُحكمة

ينبغي أن تتحمل الحاوية التي تضم قلب المفاعل وأجهزة التحكم ضغطَ المائع الحامل للحرارة. وهي إما أن تكون من الخرسانة المسبقة الإجهاد سمكها عدة أمتار (كما في المفاعلات العاملة على اليورانيوم الطبيعي والجرافيت والغاز)، أو أن تكون معدنية يبلغ سمكها نحو 15 سم مبطنة من الداخل بالفولاذ غير القابل للصدأ (كما في مفاعلات الماء العادي).

تخصيب اليورانيوم

عملية التخصيب عبارة عن عزل نظائر عناصر كيميائية محددة Isotope separation من عنصر ما لغرض زيادة تركيز نظائر أخرى للحصول على مادة تعتبر مشبعة بالنظير المطلوب. على سبيل المثال، عزل نظائر معينة من اليورانيوم الطبيعي للحصول على اليورانيوم المخصب واليورانيوم المنضب. وتتم عملية التخصيب على مراحل حيث يتم في كل مرحلة عزل كميات أكبر من

النظائر غير المرغوبة حيث يزداد العنصر تخصيبا بعد كل مرحلة لحد الوصول إلى نسبة النقاء المطلوبة.

على سبيل المثال، اليورانيوم المخصب عبارة عن يورانيوم تمت زيادة نسبة نظائر اليورانيوم-235 فيه وازالة النظائر الأخرى. وعملية التخصيب هذه صعبة ومكلفة وتكمن الصعوبة ان النظائر الذي يراد ازالتها من اليورانيوم شبيهة جدا من ناحية الوزن للنظائر الذي يرغب بالابقاء عليها وتخصيبها. وتتم عملية التخصيب باستخدام الحرارة عبر سائل أو غاز لتساهم في عملية عزل النظائر غير المرغوبة. وهناك طرق أخرى أكثر تعقيدا كاستعمال الليزر أو الأشعة الكهرومغناطيسية.

وتبلغ نسبة اليورانيوم-235 الذي يراد تخصيبه من إجمالي ذرة اليورانيوم الطبيعي نسبة 0.7% فقط، ولكن هذا الجزء هو المرغوب فيه لكونه أخف من ناحية الكتلة من الأجزاء الأخرى من اليورانيوم الطبيعي. الجزء المتبقي من اليورانيوم الطبيعي بعد استخلاص جزء اليورانيوم-235 يسمى اليورانيوم-238. ولقد تم تخصيب اليورانيوم لأول مرة في الولايات المتحدة بعد الحرب العالمية الثانية، حيث تم بناء 3 من المفاعلات النووية في ولايات تينيسي وأوهايو وكنتاكي. وكانت الطريقة المستعملة عبارة عن ضخ كميات كبيرة من اليورانيوم على شكل غاز يورانيوم هيكسافلوريد uranium hexafluoride إلى حواجز ضخمة تحوي على ملايين الثقوب الصغيرة جدا، وبهذه الطريقة يتم انتشار اليورانيوم-235 (وهو الجزء المطلوب) بسرعة أكبر نسبة إلى اليورانيوم-238 (وهو الجزء غير المرغوب فيه لكونه أثقل)، وتم استغلال الفرق في سرعة الأنتشار وجمع كميات هائلة من اليورانيوم-235. وتمتلك الولايات المتحدة يورانيوم مخصب من النوع العالي الخصوبة بنسبة 90%.

أنواع المفاعلات

يطلق علي مفاعلات الإنشطار النووي The nuclear fission reactors في الولايات المتحدة الأمريكية اسم مفاعلات الماء الخفيف " light water reactors" ومنها مفاعل الماء المغلي، ومفاعل الماء المضغوط. وهي منتشرة

كثيرا في العالم الغربي وفي اليابان وكوريا، وهي تحتلف عن مفاعلات الماء الثقيل "heavy water reactors" التي تستخدم في كندا.

والماء الخفيف هو الماء العادي الذي يستخدم في قلب المفاعل مع وحدات الوقود النووي كوسيط لتهدئة moderator سرعة النيوترونات، حيث يحتاج انشطار نواة ذرة اليورانيوم-235 أن تصدمها نيوترونات بطيئة وليست سريعة. ويعمل الماء في نفس الوقت كمبرد وناقل للحرارة، حيث يتحول في المفاعل إلى بخار ذو ضغط عالي. ويحدث ذلك في غلاية أو خزان كبير يسمى خزان الضغط للمفاعل. وهو علي هيئة شكل أسطواني رأسي، يبلغ قطرها 5 مترات بارتفاع 8 متر، ذات جدار من الحديد الصلب بسمك 25 سنتيمتر. ويحتوي خزان الضغط وحدات الوقود النووي المخصب غاطسة في الماء، وكذلك قضبان من مادة تمتص النيوترونات، مثل: سبيكة الصلب والبور أو الكادميوم، يمكن بواسطتها ضبط سير التفاعل النووي أو إيقافه.

يُنتج التفاعل النووي طاقة حرارية كبيرة فيسخن الماء في خزان الضغط ويتحول إلى بخار ذو ضغط عالي. يرتفع ضغط البخار في خزان الضغط إلى نحو 350 ضغط جوي ويكون في درجة حرارة نحو 450 درجة مئوية. يوجه هذا البخار عن طريق أنابيب ضخمة ليدير زعانف التوربينات التي تدير بدورها مولدات القوي الكهربائية. بذلك تتحول الطاقة النووية إلى طاقة حرارية ثم إلى طاقة حركة التوربين إلى طاقة كهربائية لإدارة المصانع وإنارة البيوت.

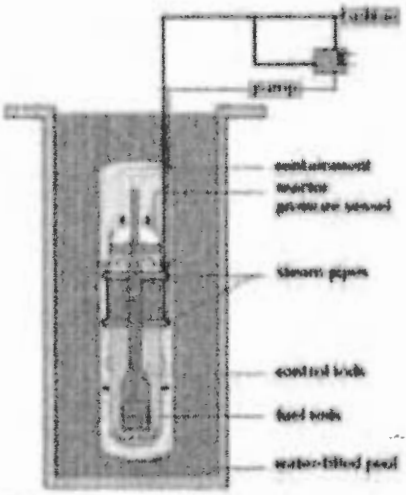
واستعمال الماء العادي يتطلب تخصيب وقود اليورانيوم لدرجة بين 2.5 % إلى 3.5 % باليورانيوم-235. وكلا النوعين من المفاعلات اللذان يعملان بالماء الخفيف، وهما: مفاعل الماء المضغوط (Pressurized water reactor PWR) وتتم فيه دورتين (دورة أولية ودورة ثانوية) للماء والبخار من خزان الضغط إلى التوربنات ويفصلهما مبادلات للحرارة فيكون بخار تشغيل التوربينات معزولا عن دورة الخزان. والنوع الثاني من مفاعلات الماء العادي تسمى مفاعل الماء المغلي (Boiling water reactor (BWR. يستخدم مفاعل الماء المغلي دورة واحدة للماء والبخار من خزان الضغط إلى التوربينات ثم إلى خزان الضغط.

ويطلق علي مفاعلات الإنشطار النووي في كندا مفاعلات الماء الثقيل حيث يعمل الماء الثقيل كوسيط بالمفاعل ويقوم الديوتيريوم deuterium، وهو الإيدروجين الثقيل الموجود في الماء الثقيل بتقليل سرعة النيترونات في التفاعل

الإنشطاري المتسلسل.وهذا النوع من المفاعلات لايتطلب وقود يورانيوم مخصب بل طبيعي ويطلق علي هذه المفاعلات الكندية مفاعلات كاندو CANDU.
كما هناك نوع من المفاعلات النووية تعمل بدون ماءالتبريد، ويستخدم فيها غاز الهيليوم كوسط لخفض سرعة النيوترونات وكناقل للحرارة في نفس الوقت.
من مميزات هذا النوع من المفاعلات الذرية أنها يمكن أن تعمل باليورانيوم الطبيعي أو الثوريوم وهو عنصر نووي توجد خاماته الأولية في كثير من البلاد.
علاوة على ذلك فإن مفاعل الثوريوم يعمل في درجات حرارة عالية تصل إلى 900 درجة مئوية، ولهذا يتمتع بكفاءة حرارية عالية. كما يمكن استغلال تلك الحرارة العالية مباشرة في بعض الإنتاجات الصناعية التي تتطلب درجات حرارة عالية. وقد طُور هذا النوع من المفاعلات التي تسمى مفاعلات الثوريوم عالية الحرارة بنجاح في ألمانيا.
وأهم أنواع المفاعلات، هي:
- مفاعل الماء الخفيف
- مفاعل سريع بتبريد الرصاص ويستخدم في بعض الغواصات الروسية.
- مفاعل ملح منصهر تعمل بالثوريوم
- مفاعل بتبريد غازي تقدمي ويعمل باليورانيوم الطبيعي أو يورانيوم مخصب.
- مفاعل الماء الثقيل المضغوط وهو يعمل باليورانيوم الطبيعي.

مفاعل الماء الخفيف light water reactor

هو نوع من المفاعلات النووية الحرارية thermal reactor يستخدم الماء العادي كمهدئ للنيوترونا تولتبريد، بعكس المفاعلات التي تستخدم الماء الثقيل لتهدئة سرعة النيوترونات وكمبرد. ومفاعلات الماء الخفيف هي أكثر أنواع المفاعلات انتشارا والتي تستخدم لإنتاجالطاقة الكهربائية من الطاقة النووية.
وتوجد ثلاثة أنواع من مفاعل الماء الخفيف، مفاعل الماء المضغوط، ومفاعل الماء المغلي والمفاعل الذي يسمى مفاعل الماء فوق الحرج supercritical water reactor.



مفاعل ماء خفيف عديم المضخة

تصميم المفاعل

ينتج مفاعل الماء الخفيف الطاقة الحرارية عن طريق التفاعل الانشطاري المتحكم فيه. ويتكون المفاعل من قلب المفاعل الذي يحتوي على وحدات الوقود النووي. وهو يحتوي أيضاً على قضبان للتحكم في سير التفاعل. ويتكون الوقود النووي من قضبان من الوقود النووي يبلغ قطرها 1 سم وطولها نحو 7و3 متر، وهي مجمعة في حزم تسمى وحدات الوقود، ويكون شكلها شكل القفص.

أقراص أكسيد اليورانيوم. تعبأ فوق بعضها البعضفي أنابيب بنفس المقطع من الزركونيوم، لتكوين قضيب وقود طوله نحو 4 متر.

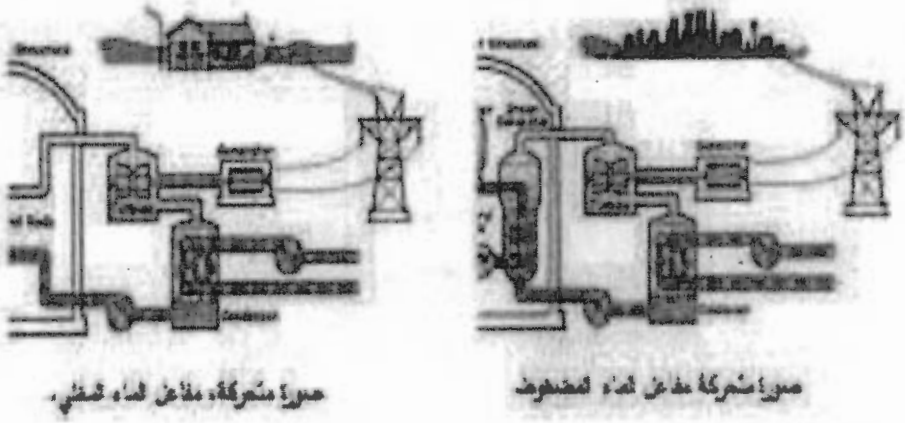
ويوجد في داخل كل قضيب وقود أقراص من اليورانيوم في شكل أكسيد اليورانيوم، بيلغ طول القرص نحو 2.5 سم، وهي مرصوصة داخل قضيب الوقود (أنبوب) فوق بعضها. وتوجد في قلب المفاعل أيضا قضبان التحكم وهي تحتوي على مادة،

مثل: الهافنيوم أو الكادميوم وهي تتميز بإمتصاصها للنيوترونات. وعند تغتيص قضبان التحكم في قلب المفاعل فلا يمكن للتفاعل النووي أن يأخذ مجراه بسبب عدم وجود النيوترونات.

وعلى العكس عند سحب قضبان التحكم من قلب المفاعل تدريجيا تبدأ النيوترونات الاصطدام بأنوية ذرات اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم-239 وعي المواد الإنشطارية، ويبدأ التفاعل التسلسلي يأخذ مجراه رويداً رويداً ويشتد. وتوجد جميع تلك الأجزاء في خزان ضغط أو غلاية ضغط محكمة مليئة بالماء، ويسمى خزان ضغط المفاعل.

وتحول الحرارة المتولدة عن الإنشطار في مفاعل الماء المغلي الماء إلى بخار، وهو يوجه مباشرة إلى تشغيل توربينات لتوليد الكهرباء. أما في مفاعل الماء المضغوط فتحول الحرارة الناشئة عن الانشطار النووي إلى دائرة ماء لأخرى تسمى الدائرة الثانوية عن طريق مبادل حراري، والبخار المتولد في الدورة الثانوية هو الذي يستخدم لتشيل التوربينات.

وفي كلتا الحالتين يعود البخار بعد إدارته للتوربينات إلى مكثف للماء لإعادة الدورة.



صورة متحركة مفاعل الماء المضغوط

صورة متحركة مفاعل الماء المغلي

ويؤخذ ماء التبريد المستخدم في مكثف البخار من نهر أو بحر مجاور، ويعاد ماء تبريد المكثف إلى النهر دافئاً نوعاً ما. كما يمكن تبريد الحرارة الزائدة عن طريق أبراج التبريد فتنتشر الحرارة الزائدة في الجو.

وتستخدم بلاد كثيرة، مثل: الولايات المتحدة الأمريكية، والدول الأوروبية واليابان وكوريا، مفاعلات الماء الخفيف لإنتاج الطاقة بالمقارنة بكندا وأيضا الصين التي تستخدم الماء الثقيل في مفاعلاتها.

إحصائيات مفاعلات الماء الخفيف

بيانات من الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

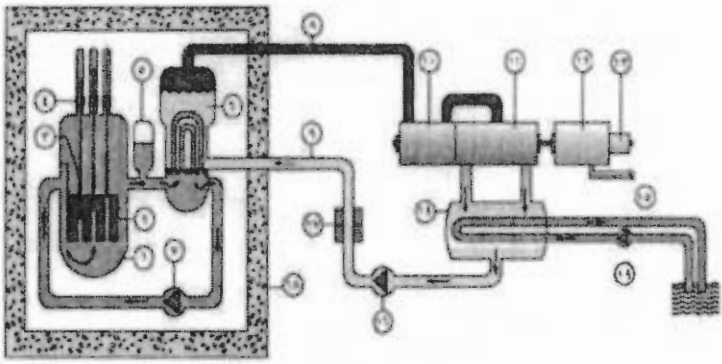
المفاعلات الشغالة.	359
المفاعلات قيد الإنشاء.	27
عدد البلدان التي فيها مفاعلات ماء خفيف	27
سعة التوليد (جيجاواط).	328.4

مفاعل الماء الثقيل المضغوط pressurised heavy water reactor

مفاعل الماء الثقيل المضغوط هو نوع من أنواع المفاعلات النووية المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية. ويستعمل فيه اليورانيوم الطبيعي (غير المخصب) كوقود نووي، ويستخدم الماء الثقيل O_2D (أكسيدالديوتيريوم)كمهدئ ومبرد في المفاعل. وطبقا لتصميم هذا المفاعل يبقى الماء الثقيل تحت ضغط عالي من أجل رفع درجة حرارة غليانه، بحيث يمكن تسخينه إلى درجات حرارة أعلى بدون أن يغلي، وذلك كما يحدث في مفاعل الماء المضغوط.

وبينما يتكلف الماء الثقيل تكلفة باهظة عن الماء العادي، إلا أن له ميزات بالنسبة إلى خصائصة بالنسبة إلى النيوترونات، فهو يمتص النيوترونات قليلا مما يجعله صالحا لتشغيل المفاعل باليورانيوم الطبيعي بدون تخصيب.

وتُستخدم مفاعلات الماء الثقيل المضغوط لتوليد الطاقة الكهربائية من الطاقة النووية



شكل تمثيلي مبسط لمفاعل الماء المضغوط.

استخدام الماء الثقيل

تنشطر أنوية اليورانيوم في المفاعل النووي نتيجة امتصاصها النيوترونات، وينتج عن الانشطار نيوترونات جديدة، تصتدم هي الأخرى بأنوية جديدة منتجة انشطارا وطاقة، ونيوترونات. وبهذا، يستمر التفاعل الذي يسمى تفاعل تسلسلي. ويتطلب ذلك توزيع هندسي للمواد في قلب المفاعل وتحكم في سير التفاعل، بحيث لا تضيع النيوترونات هباءا (إذا كان المفاعل صغير الحجم فهي تخرج منه بدون أن تحدث تفاعلا جديدا مع اليورانيوم، أو تمتصها مادة من المواد الأخرى الموجودة في المفاعل). وبالتحكم (بواسطة قضبان تمتص النيوترونات) لا يتزايد عددها تصاعديا في المفاعل فيؤدي إلى انفجار خطير.

فالغرض من التحكم في سير التفاعل التسلسلي هو المحافظة على سير التفاعل بمعدل محدد في حالة تسمي "الحالة الحرجة"للمفاعل".

ويتكون اليورانيوم الطبيعي من مخلوط لعدة نظائر ويغلب فيه النظير يورانيوم-238 ونسبة صغيرة من اليورانيوم-235 تبلغ 7و0 % فقط. ينشطر اليورانيوم-238 بالنيوترونات السريعة ذات طاقة أكبر من 1 مليون إلكترون فولت MeV.

ولا يمكن أن يستمر التفاعل مع اليورانيوم-238 حيث يمتص نيوترونات أكثر مما يصدره منها بالانشطار. ومن ناحية أخرى فإن اليورانيوم-235 هو الذي يُجري تفاعل تسلسلي، ولكن نسبته في اليورانيوم الطبيعي قليلة، فلا يمكن لليورانيوم الطبيعي القيام بتفاعل تسلسلي والوصول إلى الحالة الحرجة بمفرده.
وللتحايل على أن يعمل المفاعل يأتي عن طريق تهدئة سرعة النيوترونات بحيث يرتفع احتمال اصتدامها بأنوية اليورانيوم-235، مما يتيح الفرصة لاستمرار التفاعل في المفاعل. ولهذا، نحتاج إلى مهدئ لسرعة النيوترونات، الذي يقوم بامتصاص جزءا من طاقة حركة النيوترونات فتنخفض سرعتها إلى سرعة جزيئات المهدئ نفسها (الماء، أو الماء الثقيل). ولهذا نسمي النيوترونات في تلك الحالة "النيوترونات الحرارية " thermal neutron وكذلك "المفاعل الحراري" thermal reactors.
ويصلح الماء كمهدئ للنيوترونات حيث تعادل كتلة ذرة الهيدروجين كتلة النيوترون، فتكتسب منه جزءا كبيرا من سرعته كما يحدث في لعب البلياردو، وتنخفض سرعته. ولكن الماء في نفس الوق يمتص جزءا من النيوترونات.
فاستخدام الماء يكون مصحوبا بامتصاصه للنيوترونات وتبقى القليل منها للتفاعل مع كمية اليورانيوم-235 U^{235} القليلة هي الأخرى في المفاعل، مما لا يسمح بالوصول إلى الحالة الحرجة في المفاعل (أن يؤدي كل نيوترون إلى تفاعل مع اليورانيوم-235 مع قيام 1 نيوترون من النيوترونات الناتجة عن الأنشطار بتفاعل ثان -رغما عن امتصاص النيترونات في المواد الأخرى وضياع بعضها بسبب انطلاقها خارج المفاعل - فيقوم هذا النيوترون بتفاعل تالي مع أحد أنوية اليورانيوم-235).
ولهذا يستخدم مفاعل الماء الخفيف يورانيوم مخصب، أي يورانيوم يحتوي على نسبة أعلى من اليورانيوم-235 تصل من 3% إلى 5 %. (ويسمي اليورانيوم المستهلك في عملية التخصيب يورانيوم منضبdepleted uranium، حيث تنخفض فيه نسبة اليورانيوم-235 إلى نحو 07و0 %). وتعمل تلك ال 3% إلى 5 % من اليورانيوم-235 الموجودة في اليورانيوم المخصب على استمرار التفاعل في المفاعل والوصول إلى الحالة الحرجة.

مشكلة التخصيب

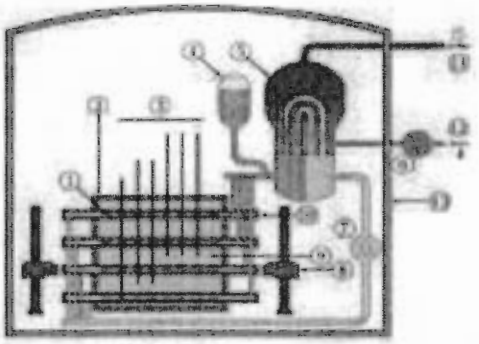
يحتاج تخصيب اليورانيوم إلى بناء مصنع للتخصيب وهو أولا يتكلف مبالغ باهظة وثانيا يحتاج إلى تصريح في إطار المعاهدة الدولية لمنع انتشار السلاح النووي. وذلك لأنه يمكن تكبير المصنع بحيث ينتج ليس فقط يورانيوم مخصب بدرجة 5% وإنما أيضا بنسبة 90% من اليورانيوم-235 والذي تصنع منه القنابل الذرية.

استخدام اليورانيوم الطبيعي

ويمكن حل مشكلة التخصيب واليورانيوم المخصب باستخدام اليورانيوم الطبيعي الذي يحتوي على 7و0% يورانيوم-235 مع الماء الثقيل كمهدئ لسرعة النيوترونات، وهو لا يمتص النيوترونات بالدرجة التي يمتصها الماء. ولذلك يصلح الماء الثقيل إيضا للعمل في مفاعل استنسال لإنتاج البلوتونيوم أو الليثيوم وهي مواد تدخل في صناعة الأسلحة الذرية.

مفاعل كاندو CANDU

صمم المفاعل الكندي المسمى CANDU اختصارا ل CANada Deuterium Uranium reactor ليعمل بالماء الثقيل المضغوط كمهدئ واليورانيوم الطبيعي لإنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة النووية.



رسم توضيحي لمفاعل كاندو، الدورة الإبتدائية باللونين الأصفر والبرتقالي، والدورة الثانوية بالأزرق والأحمر. وترى قضبان التحكم (3) ساقطة جزئيا في قلب المفاعل.

تصميم المفاعل

1- حزمة الوقود	5-مولد البخار	8- ألة تموين الوقود	11 بخار خارج لتشغيل التوربين
2-قلب المفاعل	6- طلمبة ماء عادي	9- الماء الثقيل	12 عودة الماء البارد من التوربين
3-قضبانالتحكم	7- طلمبة الماء الثقيل	10- أنبوب الضغط	13 مبني المفاعل لمنع الإشعاع إلى الخارج
4 - خزان الماء الثقيل			

ويماثل مفاعل الماء الثقيل المضغوط تقريبا مفاعل الماء المضغوط المعتاد، إلا أنه يختلف عنه في بعض التفاصيل.

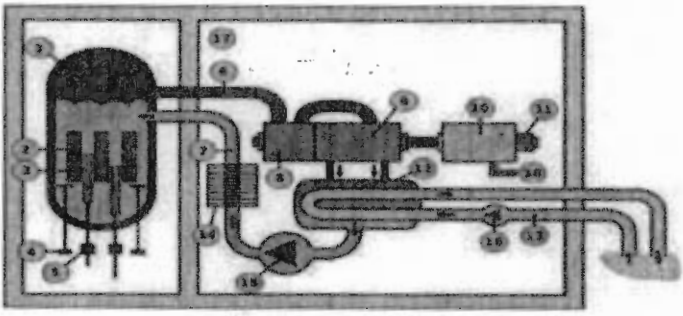
يقوم التفاعل النووي بتوليد حرارة في قلب المفاعل وتعتبر تلك الدورة هي الدورة الابتدائية ذات ضغط مرتفع. ويعمل المبادل الحراري على نقل الحرارة إلى الدورة الثانوية التي تعمل بالماء العادي وإنتاج البخار، وهو الذي يقوم بتدوير التوربين المتصل بمولد كهربائي.

بعد خروج بخار الماء من التوربين يُكثف في مكثف للبخار بواسطة ماء كثير مأخود من نهر مجاور، ويعاد الماء ثانيا إلى المبادل الحراري لتكملة الدورة. ويمكن الاستعاضة عن التبريد بواسطة ماء النهر وذلك باستخدام برج تبريد.

مفاعل الماء المغلي Boiling Water Reactor

مفاعل الماء المغلي (بالإنجليزية:) هو نوع من مفاعل نووي يشبه مفاعل الماء المضغوط وينتمي الإثنان إلى فصيلة مفاعلات المياة الخفيفة. وبينما يحتوي مفاعل الماء المضغوط على دائرتين للماء والبخار - واحدة منها مشعة والأخرى

غير مشعة، وبينهما مبادل حراري، فيتكون مفاعل الماء المغلي من دورة واحدة للماء وبخار الماء.



مخطط مفاعل ماء مغلي.

1.حجرة ضغط المفاعل
2.عنصر وقود نووي
3.قضبان تحكم
4. مضخات الدوران
5. قضبان التحكم في المحرك
6. بخار .
7. تغذية المياه
8. توربين ضغط عالي .
9. توربين ضغط منخفض
10.مولد
11.مثير
12.مكثِف
13.مبرِّد
14.مسخن مسبق
15. Feedwater pump
16.مضخة ماء بارد
17.حاوية خرسانية
18.وصلة المحابس

تصميمه

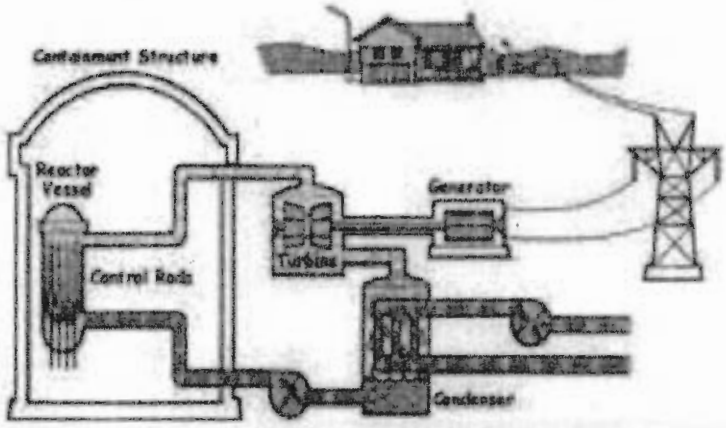
1- خزان الضغط للمفاعل من الفولاذ (سمك 25 سنتيمتر)
2- وحدات الوقود النووي (يورانيوم مخصب)
3- قضبان الضبط من الكادميوم تمتص النيوترونات.
6- خروج البخار المضغوط
7- رجوع الماء المضغوط
8- توربين بخاري ضغط عالي

9- توربين بخاري ضغط متوسط
10- مولد كهربائي
12- مكثف البخار
13- ماء تبريد (من نهر مجاور)
14- تسخين ابتدائي للماء
15- طلمبة ضخ الماء إلى خزان الضغط.

يوجد خزان الضغط للمفاعل في مبني منفرد، وبجانبه مبني ورشة التوربينات ومولد الكهرباء. كلا المبنيين ذوا حائط سمكه من 1 إلى 5و1 متر تتحمل اصطدام طائرة مقاتلة بسرعة الصوت. وفي بعض الطرازت يحاط خزان ضغط المفاعل بكرة محكمة من الصلب إضافية بحيث تحتوي أي تسريب لمواد مشعة من خزان الضغط للمفاعل في حالة الطوارئ، أو انفجار أحد الأنابيب الرئيسية، وتشكل تلك الكرة حاجزا إضافيا بين خزان الضغط للمفاعل والمبنى الخرساني السميك.

طريقة عمله

يضخ الماء الساخن الذي سبق تسخينه إلى خزان الضغط للمفاعل والذي هو عزول بواسطة بناية الحجز عن باقي مباني المفاعل. وتوجد في خزان الضغط صندوق وحدات الوقود المصنوع من أكسيد اليورانيوم المخلوط بنسبة 0و4 % باليورانيوم-235. ويكون خزان الضغط ممتلئا إلى نحو ثلثيه بالماء. ويؤدي التفاعل الإنشطاري إلى تولد حرارة تعمل على رفع درجة حرارة الماء وتكون البخار، فيرتفع الضغط في خزان الضغك إلى 71 ضغك جوي كما ترتفع درجة الحرارة إلى 276 درجة مئوية. ويقوم هذا البخار المتولد في خزان الضغط بتحريك توربين. يتصل بالتوربين مولد كهربائي ضخم يحول طاقة الحركة الواردة إليه إلى طاقة كهربائية. وبعد خروج البخار من التوربين يكثف بواسطة ماء تبريد ويعود إلى الحالة السائلة، ثم يوجه إلى دورة المفاعل ليعمل من جديد.



إلى اليسار خزان ضغط المفاعل، وبوجد معزولا فى صرح خرسانى سميك containment، وتخرج منه أنابيب دائرة البخار إلى التوربين وبالتالى المولد الكهربائى، وبرى مكثف البخار وطلمبة وهم جميعا في ورشة معزولة عن خزان المفاعل (غير مرسومة).

وتبلغ كمية ابخار الناتجة في خزان الضغط في مفاعل الماء المغلي في أحد المفاعلات الألمانية نحو 7000 طن في الساعة. كما يمكن ضبط قدرة المفاعل عن طريق طلمبات ضخ المياه إلى درجة من 60 % إلى 100%. كما تساعد قضبان ضبط التفاعل أيضا على ضبط قدرة المفاعل، وتكون قضبان الضبط مصنوعة من كربيد البور والهافنيوم أو الكادميوم / وعند توقيف جميع طلمبات ضخ المياه إلى خزان الضغط تنخفض قدرة المفاعل إلى نحو 30% إلى 40 % من قدرته الاسمية، وتسمى تلك الدورة المنخفضة القدرة نقطة الدورة الطبيعية.
وتبلغ كفاءة عمل مفاعل الماء المغلي أقل قليلا من كفاءة مفاعل الماء المضغوط. وتبلغ كفاءة توليد الكهرباء نحو 35 %.

الأمان

مكونات وعوامل الأمان لمفاعل الماء المغلي.

يعمل التوربين في مفاعل الماء المغلي بالبخار القادم مبتشرة إليه من خزان الضغط للمفاعل. أي أن الماءالمغلي والبخار يحتويان على شوائب مشعة وهي لا تنحصر على خزان الضغط فقط، وهذا يستدعي إجراءات اللحام لدائرة البخار من خزان الضغط وإليه بعناية كبيرة. ومن وجهة الوقاية من الإشعاع فتصنف

ورشة التوربين على أنها منطقة انضباط، وهذا معناه أنه أثناء عمل المفاعل لا يسمح بتواجد أحد العاملين في تلك الورشة إلا لدقائق قليلة، حيث يكون معدل الإشعاع مرتفع نسبيا في ذلك المكان.

ويترك البخار العالي الضغط خزان المفاعل بعد أن يمر على جهازي مفصل الماء ومجفف البخار وبذلك تقل درجة إشعاعه أقل من درجتها في ماء الخزان كثيرا. وتتكون المواد المشعة المتكونة في البخار الجاف من الأكسجين المشع وغازات خاملة مشعة، التي يبلغ عمر النصف لها من عدة ثوان إلى عدة دقائق. ولكن مع مرور الوقت تصبح أنابيب التوصيل إلى التوربين والتوربين نفسه ملوثة بالإشعاع سطحيا. وعند استبدال أحد تلك الاجزاء فيجري تنظيف لأسطحها بواسطة الجلخ، مثل استعمال خراطيم الرمل المضغوط.

وتدخل قضبان ضبط التفاعل في خزان الضغط لمفاعل الماء المغلي من أسفل وهي تكون موزعة في قلب المفاعل بين وحدات الوقود النووي. ويقوم بضبطها محركات كهربائية خاصة سريعة الإغلاق وهي لا تعتمد على النظام العامل بضغط الماء. أي أن هذا لنظام يتبع مبدأ العطل الآمن عند حدوث عطل، ويتم ذلك بأن التوقيف السريع لدائرة التوليد يتم عن طريق طاقة مخزونة في خزانات للضغط تعمل تلقائيا. وإذا حدث أن تعطلت دوائر قضبان الضبط فيجري إيقاف عمل المفاعل عن طريق ضخ ماء يحتوي على حامض البور، وهو يمتص النيوترونات بشدة ويوقف التفاعل النووي.

وبالمقارنة بمفاعل الماء المضغوط فتكون قضبان الضغط من أعلى في قلب المفاعل، وفي حالة الإيقاف التلقائي السريع فهي تسقط سقوطا حرا في قلب المفاعل بسبب وزنها، ووقف على الفور التفاعل النووي.

حرارة الإشعاع الباقية

تنشأعن التفاعل النووي في المفاعل كميات هائلة من مواد مختلفة مشعة وهي تتميز بارتفاع درجة حرارتها بسبب إشعاعها، وتعتمد درجة حرارتها على عمر النصف لنظائرها المختلفة. أي أنه عندما يتوقف عمل المفاعل تلقائيا بسبب عطل، وتوقف التفاعل النووي فيه، إلا أن حرارة الإشعاع تبقى سائدة وتستمر لفترة طويلة إذا تركت هكذا. لذلك تجرى احتياطات بنائية للتخلص من حرارة الإشعاع حتى تتوقف دوائر الماء المنضغط والبخار بالفعل. ويجري ذلك في

مفاعل الماء المغلي عن طريق ضخ بخار في مكثف التوربين أو ضخه في خزان تكثيف. بذلك يستخلص جزء كبير من الحرارة عن طريق البخار، ولهذ يحتاج مفاعل الماء المغلي كمية قليلة من الماء تضخ فيه لاستخلاص حرارة الإشعاع الباقية.

وتوجد في كل مفاعل من مفاعلات الماء المغلي طلمبات عالية الضغط تعمل بواسطة توربين بخاري صغير، تدفع ماء تبريد في حزان الضغط للمفاعل. وتساعد في ذلك بطريات كبيرة بحيث يُضمن تبريد قلب المفاعل لمدة محدودة حتى في حالة فشل المولدات الاحتطياطية التي تعمل بالديزل.

ومن خواص الأمن المميزة لمفاعل الماء المغلي هو إمكانية تبريد الأجزاء العلوية لوحدات الوقود عن طريق مرور البخار عليها. فإذا حدث وكان منسوب الماء في قلب المفاعل منخفضا بحيث تبقى أجزاء وحدات الوقود عارية من الماء، فإن البخار المندفع من أسفل إلى أعلى يكفي لتبريدها تلقائيا بحيث لا تفسد بفعل حرارتها المرتفعة.

أنواع مفاعلات الماء المغلي

الجيل الأول

أنشأ الجيل الأول للمفاعلات في ألماني من مفاعلات الماء المغلي بالعمل المشترك بين جنرال إلكتريك وشركة AEG الأمانية في الخمسينيات والستينيات من القرن الماضي. وقد قامت الشركتان ببناء 4 مفاعلات آنذاك من هذا النوع. وقد انتهت مدة تشغيل تلك المفاعلات ن وعم في سبيل الهدم وإعادة الأرض خضراء كما كانت.

كما يوجد في سويسرا مفاعل من هذا النوع من صنع جينرال إليكتريك وهو لا يزال يعمل.

طراز 69

قامت شركة Kraftwerk Union الالمانية عام 69 بتطوير هذا الطراز ويتميز هذا الطراز بتحويط خزان المفاعل بوعاء ضخم في شكل الكرة من الفولاذ تسع له، بالإضافة إلى البناء السميك الخرساني. وطبقا لهذا التصميم للمفاعل أصبح بناء المفاعل يستطيع تحمل صدمة طائرة مقاتلة سؤعتها فوق الصوت من دون

أن يصاب المفاعل نفسه بخلل. صنعت أربعة مفاعلات من هذا الطراز في ألمانيا وعي لا تزال تعمل، وآخرهم من هذا النوع مفاعل كروميل قرب هامبورج وهو أكبر مفاعل ماء مغلي في العالم. [1]

طراز 72

وهو آخر طراز منفذ في ألمانيا وصمم عام 1972. ويتخذ شكل بناء المفاعل في هذا الطراز الشكل الأسطواني. ويعتبر الطراز 72 تطوير للطراز 69 حيث تم تطوير أنظمة الأمان وتطوير المباني. [2]

تطور عام 2009

قامت شركة أريفا Areva NP الفرنسية بالإشتراك مع شركة E.ON الألمانية بتطوير مفاعل جيد أعطوه اسم KERENA وهو تطوير لطراز 72، وهو من نوع مفاعل الماء المغلي وذو قدرة تصل إلى 1250ميجاوات. وقد أعربت ولاية نيو برونزويك بكندا إلى شركة أريفا عن عزمها في طلب بناء واحد من مفاعلات النوع الجديد KERENA.

فصل نظائر اليورانيوم

تعتمد شدة التفاعل النووي المتسلسل على نسبة اليورانيوم – 235 في الوقود النووي، فكلما زادت نسبته كانت كمية الطاقة الناتجة أعلى، ومن هنا تكمن الحاجة لفصل نظائر اليورانيوم عن بعضها للحصول على يورانيوم – 235 أنقى.

ومن الصعب فصل نظائر اليورانيوم عن بعضها بطرق كيميائية لأن نظائر العنصر الواحد متشابهه في السلوك الكيميائي، إلا أن اختلاف النظائر في السلوك الفيزيائي يسهل علينا فصلها عن بعضها، فالنظيرين يورانيوم – 235 ، ويورانيوم – 238 يختلفان عن بعضهما في الكتلة.

العلماء الذين عملوا على صناعة القنبلة النووية اكتشفوا العديد من الطرق لفصل نظائر اليورانيوم، واحدى تلك الطرق طريقة الإنتشار الغازي والتي تعتمد على الاختلاف البسيط في الانتشار خلال غشاء شبه منفذ بين سادس فلوريد اليورانيوم – 235 $_6F^{235}U_{92i}$ وسادس فلوريد اليورانيوم – 238 $_6F^{238}U_{92i}$ مما يؤدي إلى اتخاذ كل منهما مسارين مختلفين عند التأثير عليهما بمجال كهرمغناطيسي مما يؤدي إلى فصلهما.