الفصل الثاني

محطات القدرة النووية

• مقدمة • المكونات الأساسية للمحطة • المواد الأساسية للمفاعل النووي • أنواع المفاعلات النووية الانشطارية • التحكم في المفاعل النووي • تمارين

(٢,١) مقدمة

الوظيفة الأساسية لمحطات القدرة النووية هي إنتاج الطاقة الكهربائية من خلال انشطار ذرات الوقود الثقيلة، مثل اليورانيوم أو البلوتونيوم. وتستعمل الطاقة الحرارية الهائلة الناتجة عن ذلك التفاعل النووي لتسخين الماء وإنتاج البخار لتشغيل التربينة، ثم توليد الطاقة الكهربائية. ولهذا؛ فإن لهذه المحطات أوجه تشابه عديدة مع محطات القدرة الكهربائية العادية التي تستعمل الوقود الأحفوري سواءً كان فحماً حجرياً أو نفطاً أو غازاً طبيعياً.

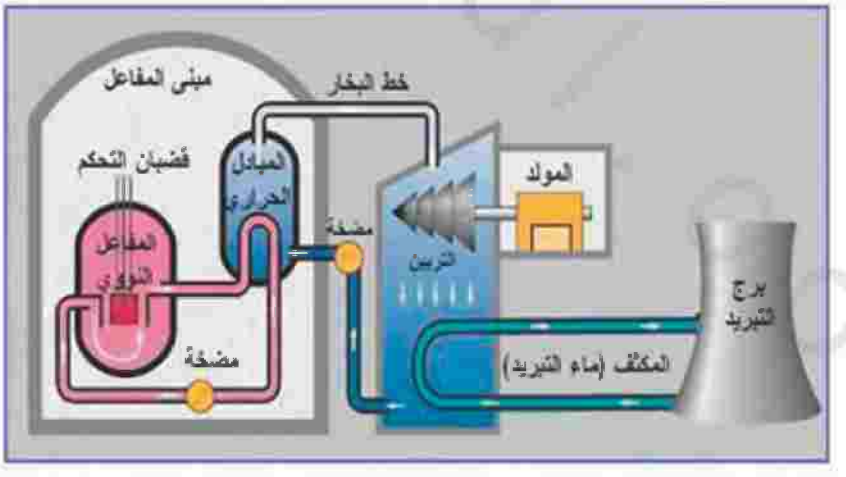
ويتمثل الفرق الأساسي بين هذه المحطات في نوع الوقود المستعمل ونوع التفاعل للحصول على الطاقة الحرارية. وتحكم عملية حرق الوقود الأحفوري في محطات القدرة الكهربائية العادية التفاعلات الكيمائية، لكن تحكم عملية الانشطار في محطات القدرة النووية التفاعلات النووية التي تنتج طاقة ضخمة، وعلى سبيل المثال فإن

انشطار نوى واحد كيلوغرام من اليورانيوم تنتج طاقة مكافئة لحرق حوالي ١٤,٥ طناً من الفحم الحجري أو ١٠ أطنان من النفط. وهكذا تظهر أهمية إنتاج الطاقة الكهربائية عن طريق المفاعلات النووية من الناحية الاقتصادية والبيئية.

يختص هذا الفصل بشرح المكونات الأساسية لمحطات القدرة النووية وتوضيح دور كل جزء من هذه المنشآت الكبرى. وسيتطرق أيضاً إلى تصنيف المفاعلات النووية الانشطارية المختلفة، وتفاصيل التحكم، وتشغيل هذه المحطات.

(٢,٢) المكونات الأساسية للمحطة

تحتوي محطات القدرة النووية على الرغم من اختلاف بعضها عن بعض على أجزاء أساسية توجد في كل منها، مثل: قلب المفاعل، المبادل الحراري، الوعاء، الحواجز الإشعاعية، التربينة والمولد الكهربائي وتوابعهما. يوضح الشكل رقم (٢,١) محطة القدرة النووية بأجزائها الأساسية.



الشكل رقم (٢,١). نموذج لمحطة القدرة النووية.

(٢,٢,١) قلب المفاعل

يمثل قلب المفاعل النووي أهم عناصر محطة القدرة النووية، حيث إنه مصدر الطاقة الحرارية الرئيسي، فهو بمثابة الغلاية في محطات القدرة العادية. ويحتوي قلب المفاعل على مجموعة من حزم قضبان الوقود والتحكم، وعلى مادتي التبريد والتهدئة اللتين تكونان واحدة أحياناً كما هو الحال في المفاعلات النووية للماء الخفيف.

تُوضع هذه القضبان وفق أشكال هندسية مختلفة حسب نوع المفاعل مع مراعاة الفراغات اللازمة لمرور المبرد بينها ونقل الحرارة الناتجة عن التفاعلات النووية الانشطارية داخلها. وتُنتج الانشطارات النووية المتسلسلة بالإضافة إلى الطاقة الهائلة (حوالي MeV 200) لكل انشطار، معدل ٢,٥ نيوتروناً سريعاً؛ ولهذا يجب أثناء التصميم واختيار مواد قلب المفاعل والعمل على الحد من تسرب هذه النيوترونات إلى خارج المفاعل والمحافظة على نيوترون واحد على الأقل من هذه النيوترونات الانشطارية لمواصلة الانشطار المتسلسل. وبما أن هذا النيوترون له احتمال أكبر في إحداث انشطار جديد عندما تكون طاقته حرارية، فيجب وضع مواد مهدئة للنيوترونات الانشطارية في قلب المفاعل، وتكون أحياناً المادة المهدئة ومادة التبريد واحدة في بعض المفاعلات النووية. وسنتعرض لشرح خصائص كل هذه المواد لاحقاً في هذا الفصل.

تتميز قضبان التحكم بكفاءة عالية في امتصاص النيوترونات وأثناء تشغيل المفاعل تكون قضبان التحكم هذه معلقة فوق قلب المفاعل مما يسمح للنيوترونات بأداء دورها في عملية الانشطار. لكن عند إدخال هذه القضبان في قلب المفاعل تمتص قضبان التحكم النيوترونات التي هي المحرك الأساسي للتفاعلات النووية، فتخمد التفاعلات ويتوقف المفاعل.

غالباً، ما تُوضع مواد عاكسة للنيوترونات كغطاء داخلي لقلب المفاعل للحد من تسربها إلى الخارج، وتكون في الكثير من الأحيان من مادة التهدئة نفسها باستثناء

المفاعلات السريعة التي لا تحتاج إلى مادة مهدئة أصلاً بل يوضع غطاء من مواد ثقيلة حول قلب المفاعل لكنها لأغراض أخرى.

(٢,٢,٢) المبادل الحراري

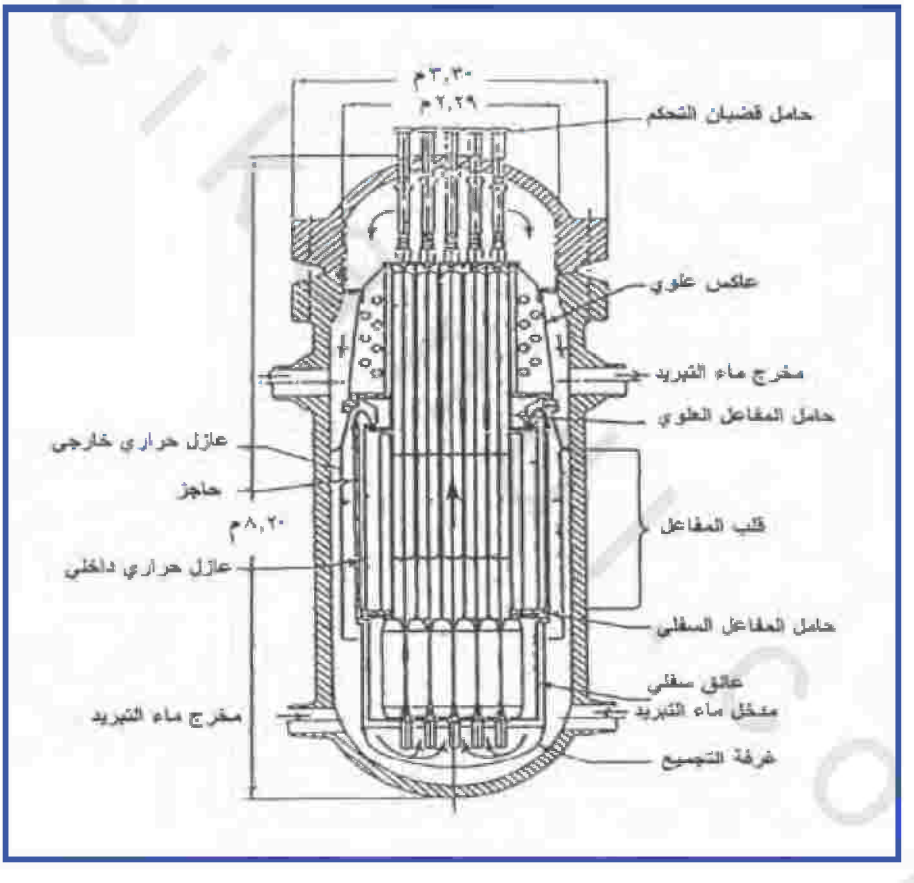
المبادل الحراري هو وعاء يشبه "الراديتر" يتم داخله انتقال الحرارة من مائع التبريد في الدورة الحرارية الأولى إلى ماء الدورة الحرارية الثانية بطريقة غير مباشرة، ويتخلل وعاء المبادل الحراري عادة مجموعة من الأنابيب المنحنية على شكل حرف U يمر داخلها تحت ضغط عالٍ مائع تبريد قلب المفاعل. يدخل ماء الدورة الثانية من أسفل الوعاء فيمتص الحرارة عند مروره حول أنابيب مائع التبريد فيتحول الماء إلى بخار ويخرج من أعلى وعاء المبادل الحراري متجهاً إلى التربينة. وتُستعمل دائرتان منفصلتان للتبريد داخل وعاء المبادل الحراري للحصول على بخار نظيف خالٍ من الإشعاع في الدورة الثانية، وذلك لعدم تلوث التربينة وتوابعها، مما يساعد في عمليات الصيانة لاحقاً والحد من خطر الإشعاع.

(٢,٢,٣) الوعاء والحواجز الإشعاعية

يُصنع وعاء المفاعل النووي من الحديد الذي لا يقل سمكه عن عشرة سنتمترات، لكي يتحمل الضغط بالإضافة على أنه يكون حاجزاً لتسرب الإشعاعات، وتضاف للوعاء طبقة داخلية من الحديد غير قابل للصدأ إذا لم يكون كله من هذه المادة، وذلك لمنع التآكل والصدأ. ويكون عادة الوعاء على شكل أسطواني ذي قعر مستدير كما هو الحال بالنسبة للغطاء، إلا أن الغطاء يكون متحركاً لإدخال قلب المفاعل والمضخات والمبادل الحراري إلى آخره، ويتم إحكام ربطه قبل تشغيل المفاعل.

يحتاج تصنيع الوعاء إلى تقنية عالية لا تملكها إلا بعض الشركات في العالم وذلك لكبر أبعاده وإنتاجه كقطعة واحدة بدون استعمال اللحام. تتراوح أبعاد وعاء المفاعلات النووية بين مترين و٥ أمتار للقطر، وارتفاع بين ٥ أمتار و١٥ متراً. ويُوضع

وعاء المفاعل داخل مبنى خالٍ من الأعمدة، ذي قبة مستديرة مشهورة، كما لهذا المبنى مواصفات خاصة، حيث يكون من الأسمنت المسلح، ولا يقل سمكه عن متر واحد. ويعدُّ هذا المبنى آخر حاجز للإشعاعات بين قلب المفاعل والبيئة الخارجية. ويوضح الشكل رقم (٢,٢) وعاء لمفاعل الماء المضغوط.



الشكل رقم (٢,٢). وعاء لمفاعل الماء المضغوط [٢].

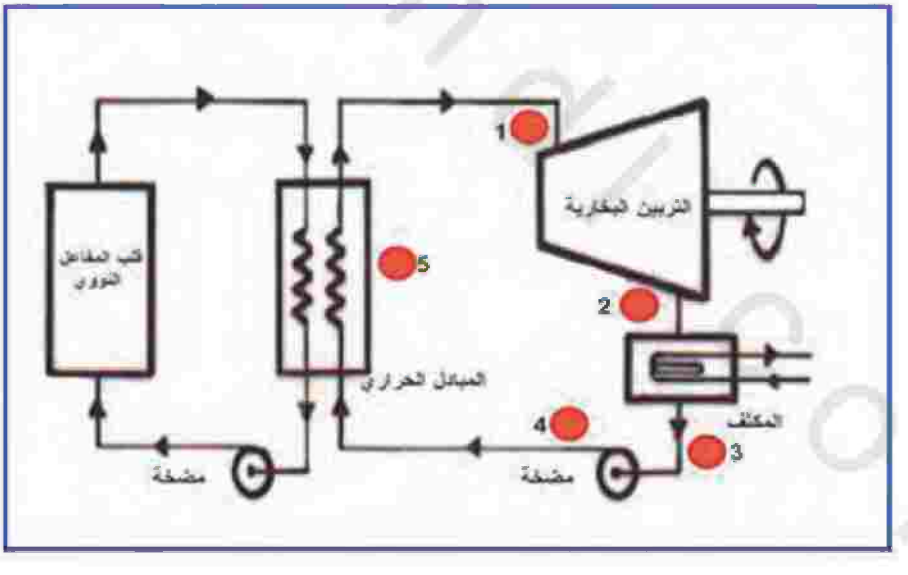
تؤدي التغييرات الفيزيائية لمائع التشغيل (من ضغط وحجم) لإنتاج شغل يولد دوران التربينة البخارية وفق دورة "رانكن" الحرارية، كما هو موضح في الشكل رقم (٢,٣)، الذي يلخص الخطوات الأساسية لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية في محطات القدرة.

أولاً: يتمدد البخار المشبع (النقطة ١) أديباتيكلي في التربينة البخارية فيخرج على شكل خليط من البخار والماء من التربينة (النقطة ٢).

ثانياً: يتم تكثيف هذا الخليط ليصبح سائلاً عند خروجه من المكثف (النقطة ٣).

ثالثاً: يُضغط السائل أديباتيكلي في المضخة (النقطة ٤).

رابعاً: تبادل الحرارة في المبادل (إضافة) إلى أن يتبخر السائل من جديد (النقطة ٥) فيصبح بخاراً مشبعاً لبداية دورة جديدة (النقطة ١).



الشكل رقم (٢,٣). الخطوات الأساسية لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية في محطات القدرة النووية [٢].

لإنتاج الطاقة الكهربائية، يُوصل محور الدوران السريع للتربينة بالجزء الدوار المولد الكهربائي (روتر) للحصول على الحقل المغناطيسي الدوار. وعند دوران هذا الحقل المغناطيسي بسرعة، يتم إنتاج القدرة الكهربائية في ملفات "ستاتور" المولد. وتُولد الكهرباء في محطات القدرة النووية بين ١١٠٠٠ و٢٥٠٠٠ فولت ثم يُرفع الفولت في محولات ليتناسب مع متطلبات شركة نقل التيار العالي الفولتية.

توابع التربينة والمولد الكهربائي في محطات القدرة النووية شبيهة بما يوجد في محطات القدرة الكهربائية التقليدية التي تستعمل الوقود الأحفوري. لكن تجدر الإشارة هنا إلى بعض الاختلافات الناجمة عن كبر التربينات والمولدات الكهربائية في محطات القدرة النووية. توضع عادة في هذه المحطات ثلاث توربينات متتالية قبل المولد للمحافظة على الاتزان والتغيرات التدريجية لخصائص سائل التشغيل (الماء). وفي هذه التشكيلة، يدخل البخار عالي الضغط إلى التربينة الأولى التي تسمى أيضاً تربينة الضغط العالي، بعد ذلك يمر البخار متوازياً إلى تربينتين منخفضتي الضغط ومتصلتين بالمولدات الكهربائية مباشرة. ويتجه بعد ذلك خليط البخار والماء الخارج من تربينات الضغط المنخفض إلى المكثف. ويحتاج مكثف محطات القدرة النووية إلى كميات كبيرة من الماء للتبريد؛ ولهذا يوضع عادة المفاعل قرب مصدر كبير للماء مثل البحار أو الأنهار ذات التدفق الكبير. لكن عندما يكون التدفق منخفضاً ويخشى على ارتفاع درجة حرارة ماء النهر وللحفاظ على البيئة تُوضع أبراج لمساعدة عملية التبريد وتقليل كمية الماء اللازمة لهذا الغرض كما هو موضح في الشكل رقم (٢,١).

(٢,٢,٤) التربينة والمولد الكهربائي وتوابعهما

يعمل الجزء الخاص بالتربينة والمولد الكهربائي وتوابعهما على تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية ثم تحويلها إلى طاقة كهربائية. وتستعمل الطاقة الحرارية الصادرة من التفاعلات النووية لإنتاج بخار الماء في المبادل الحراري وعند مرور هذا البخار في التربينة والمكثف وفق دورة "رانكن" الحرارية تتحول تلك الطاقة إلى طاقة ميكانيكية، ومن ثم تتحول إلى طاقة كهربائية عن طريق المولد الكهربائي.

(٢,٣) المواد الأساسية للمفاعل النووي

يحتوي المفاعل النووي على العديد من المواد اللازمة لتصنيع أجزائه المختلفة، مثل مكونات قلب المفاعل، والمضخات، والمبادل الحراري، والحواجز المختلفة إلى آخره. حصر كميات هذه المواد واختيار أنواعها وفق خصائص تحددها فيزياء النيوترونات من بداية تصميم المفاعل له أثر كبير في أداء المفاعل أثناء التشغيل. وأهم هذه المواد الوقود النووي والمبرد والمهدئ وعواكس النيوترونات التي توضع حول قلب المفاعل، أما المضخات والمبادل الحراري، فلها تأثير قليل بحكم أنها توضع عادة خارج قلب المفاعل لدفع مائع التشغيل.

(٢,٣,١) الوقود النووي

يعدُّ الوقود النووي من أهم المواد التي توضع في المفاعل وأكثرها تكلفة. ولقد ذكرنا سابقاً أن قلب المفاعل يحتوي خاصة على حزم قضبان الوقود التي توضح حسب أشكال هندسية تقتضيها الحاجة، وتتكون هذه القضبان من غلاف له خصائص محددة تُوضع داخله أقراص خليط من المواد الثقيلة الانشطارية والخصبة.

(٢,٣,١,١) المواد الانشطارية

المواد الانشطارية هي مواد يسهل انشطارها عند تعرضها للنيوترونات الحرارية، وهي أساس الوقود النووي. وتوجد في الطبيعة مادة واحدة انشطارية وهي اليورانيوم ^{235}U ونسبته في اليورانيوم الطبيعي لا تتجاوز 0.72 % أما المواد الانشطارية الأخرى مثل اليورانيوم ^{233}U والبلوتونيوم ^{239}Pu فهي غير موجودة في الطبيعة، لكن يمكن تصنيعها في قلب المفاعلات النووية عند الحاجة.

(٢,٣,١,٢) المواد الخصبة

المواد الخصبة أو ما يسمى أحياناً بالمواد القابلة للانشطار، وهي مواد يصعب انشطارها بالنيوترونات الحرارية لكن يمكن تحويلها إلى مواد انشطارية، وتوجد في الطبيعة مادتان قابلتان للانشطار هما الثوريوم ^{232}Th واليورانيوم ^{238}U. أما الكميات

المتوافرة في قشرة الأرض من هاتين المادتين فهي ليست بالقليلة وشبيهة بكميات المعادن العادية غير النادرة. ولتحويل مادة الثوريوم واليورانيوم إلى مواد انشطارية يجب تعريضها إلى فيض من النيوترونات الحرارية في قلب المفاعلات النووية لإحداث التفاعلات (n,γ) الآتية:

$$^{232}Th_{90} + {}^{1}n_0 \Rightarrow {}^{233}Th_{90} \xrightarrow{\beta^- (T_{1/2} = 23\ mn)} {}^{233}Pa_{91} \xrightarrow{\beta^- (T_{1/2} = 27\ days)} {}^{233}U_{92}$$

$$^{238}U_{92} + {}^{1}n_0 \Rightarrow {}^{239}U_{92} \xrightarrow{\beta^- (T_{1/2} = 23\ mn)} {}^{239}Np_{93} \xrightarrow{\beta^- (T_{1/2} = 2.3\ days)} {}^{239}Pu_{94}$$

اليورانيوم ^{233}U والبلوتونيوم ^{239}Pu الناتجين عن هذه التفاعلات هما مادتان انشطاريتان يسهل انشطارهما عند تعرضهما للنيوترونات الحرارية كما هو الحال بالنسبة لليورانيوم ^{235}U ولهذا يمكن استخدامهما في تصنيع الوقود النووي.

يكون الوقود النووي في جل المفاعلات النووية التجارية صلباً وعلى أشكال مختلفة، مثل القضبان، أو اللوحات، أو الكويرات أيضاً. وتُصنع أقراص الوقود الأكثر استعمالاً من معدن اليورانيوم النقي، أو من ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2، أو من سبائك الألمونيوم التي تحتوي على جزء كبير من اليورانيوم. ويستخدم لهذا الغرض اليورانيوم الطبيعي الذي يحتوي على ٠,٧٪ من اليورانيوم ^{235}U والباقي حوالي ٩٩,٣٪ من اليورانيوم ^{238}U. لكن أكثر الوقود المستعمل في المفاعلات النووية يحتوي على نسب تتراوح بين ٢ و٥٪ من المواد الانشطارية. وتحتاج عملية تصنيع الوقود إلى مراحل متعددة ومعقدة من بينها مرحلة التخصيب الصعبة. والمقصود بالتخصيب هو زيادة نسبة المواد الانشطارية عن النسبة الطبيعية؛ ولهذا سنخصص فصلاً كاملاً لهذا الموضوع المهم في تقنية الهندسة النووية.

تُوضع أقراص الوقود النووي داخل غلاف يحميها من التآكل ويقيها من تأثير سائل أو غاز التبريد بالإضافة إلى أنه يمنع تسرب المواد الانشطارية المشعة للمبرد. يصنع غلاف أقراص الوقود في أكثر الأحيان من سبائك الزيركينيوم أو من الحديد غير قابل للصدأ. وتُعرف هذه المواد بكفاءتها العالية في تحمل الحرارة، وامتصاصها القليل للنيوترونات، وبنسبة تآكلها الضئيلة جداً، وبمميزات كثيرة أخرى. وبحكم الظروف القاسية داخل قلب المفاعل من حرارة وتآكل للمواد والكميات الهائلة من الإشعاعات، يجب أن تتوافر في الوقود مواصفات تساعده على تحمل ذلك، وأهمها:

أولاً: الصلابة والقدرة على تحمل ظروف قلب المفاعل بدون تدهور كل المواصفات.

ثانياً: الاتزان والثبات الكيميائي.

ثالثاً: المحافظة على المواد الانشطارية ومنعها من التسرب للمبرد أو البيئة.

رابعاً: موصل جيد للحرارة وله كفاءة عالية على تحمل الحرارة.

خامساً: غلاف الوقود يجب أن يكون غير ماص للنيوترونات، وليس قابلاً للتآكل بسهولة.

(٢,٣,٢) المبرد

يستخدم المبرد لنقل كمية الحرارة الهائلة الناتجة عن التفاعلات النووية داخل قلب المفاعل النووي؛ وذلك للاستفادة من هذه الطاقة أولاً، والمحافظة على الوقود النووي ثانياً؛ ولهذا يجب أن تتوافر في المبرد كفاءة عالية لنقل الحرارة، بالإضافة إلى ميزات تخص المفاعلات النووية، مثل قلة امتصاص النيوترونات وعدم قابلية التشعيع. ومن الصعب الحصول على المبرد المثالي الذي تتوافر فيه كل هذه المواصفات، لكن كما هو الحال في الكثير من المسائل الهندسية يجب اختيار الأفضل لكل حالة، والتوفيق بين المتناقضات أحياناً. سندرس فيما يلي أكثر المواد استعمالاً لتبريد المفاعلات النووية سواء كانت سائلة أو غازية.

(٢,٣,٢,١) سوائل التبريد

يستعمل الماء وبعض سوائل المعادن لتبريد المفاعلات النووية لما يتميز كل منها بمواصفات جيدة لنقل الحرارة وقلة امتصاص النيوترونات.

أولاً: الماء

أكثر السوائل استعمالاً لتبريد المفاعلات النووية هو الماء (H_2O) بدون منافس، وذلك لوفرته في الكثير من المناطق والمعرفة المتراكمة الجيدة لخصائصه الفيزيائية والكيميائية. للماء خصائص جيدة لنقل الحرارة فهو موصل جيد للحرارة ومعامله النوعي الحراري مرتفع بالإضافة إلى أنه من المواد الخفيفة التي لا تمتص الكثير من النيوترونات من ناحية ولها مقطع مجهاري كبير لتشتت النيوترونات الانشطارية مما يجعله مهدئاً لها في الوقت نفسه. ولا يستعمل الماء العادي لتبريد المفاعلات بدون معالجة لإزالة ما فيه عادة من شوائب مختلفة وأملاح؛ ولهذا يجب تنقيته أولاً، وإزالة كل المعادن الذائبة فيه بالطرائق الكيميائية المناسبة ثانيا.

توجد أيضاً بعض المساوئ لاستعمال الماء مبرداً للمفاعلات النووية من بينها أنه قادر على امتصاص كمية لا بأس بها من النيوترونات مما يسبب تحليل الماء وتشعيع الأكسجين. وتُعالج ظاهرة فقدان النيوترونات في ماء التبريد بتخصيب أكبر للوقود النووي من ناحية، وجعل وحدة لإزالة الغازات في دائرة التبريد، واستخدام حواجز سميكة للحماية من أشعة جاما من ناحية أخرى. كذلك انخفاض نقطة غليان الماء ($100\ ^0C$) يُحتم استعماله مبرداً تحت ضغط عالٍ (2500 psi) للمحافظة على حالته السائلة أثناء التشغيل.

تحتوي جزيئات الماء الثقيل D_2O على الديتيريوم D (أحد نظائر الهيدروجين)، ويسمى هذا الماء بالثقيل؛ لأن نواة الديتيريوم أثقل من نواة الهيدروجين، وذلك لأنها تحتوي على نيوترون إضافي مع البروتون. ويتمتع الماء الثقيل ببعض خصائص الماء العادي تقريباً (درجة التجميد تساوي $3.82\ ^0C$ ودرجة التبخر تساوي $101.42\ ^0C$)،

بالإضافة إلى أنه يتميز بقلة امتصاصه للنيوترونات مقارنة بالماء العادي. ونادراً ما يستعمل الماء الثقيل لتبريد المفاعلات بسبب التكاليف الباهظة لمحطات إنتاجه، لكنه يستعمل لتهدئة النيوترونات في بعض أنواع المفاعلات.

ثانياً: سوائل المعادن

تستعمل بعض سوائل المعادن مثل الصوديوم لتبريد المفاعلات النووية السريعة خاصة وذلك لتفادي تهدئة النيوترونات من ناحية وإمكانية نقل كمية أكبر من الحرارة من ناحية أخرى. ويتميز الصوديوم السائل بمواصفات عالية لنقل الحرارة، وعدم إحداث تآكل لغلاف الوقود مثل الحديد غير قابل للصدأ حتى تحت درجات حرارة عالية ($600\ ^0C$)، ويتمتع الصوديوم أيضاً بمقطع مجهري صغير نسبياً لامتصاص النيوترونات.

توجد أيضاً بعض المساوئ للصوديوم السائل، منها أنه يتفاعل كيميائياً بشدة مع الماء مما يسبب مشاكل أحياناً في المبادل الحراري. وكذلك من عيوب الصوديوم أنه قابل لتشعيع بتكوين ^{26}Na و^{24}Na عند امتصاصه لكميات كبيرة من النيوترونات وإصدار أشعة جاما، مما يحتم وضع حواجز إشعاعية وانتظار حوالي أسبوعين بعد توقيف المفاعل للقيام بأعمال الصيانة.

(٢,٣,٢,٢) غازات التبريد

تُستعمل بعض الغازات لتبريد المفاعلات النووية لما لها من خصائص جيدة لنقل الحرارة وقلة احتمال امتصاص النيوترونات.

أولاً: غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)

يستعمل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) لتبريد المفاعلات النووية التي تُشغل عند درجات حرارة عالية، التي تحتوي على الجرافيت خاصة كمهدئ. هذا الغاز ثابت كيميائياً عند ارتفاع درجة الحرارة (حتى $650\ ^0C$)، بالإضافة إلى أنه لا يتفاعل مع الجرافيت، وكذلك قلة تكلفة إنتاجه تجعله من الغازات المفضلة لأغراض التبريد. ويتميز ثاني أكسيد الكربون أيضاً بقلة تفاعله مع النيوترونات، ومواد تغليف الوقود،

وعدم المساهمة في إتلافها. ولهذا الغاز أيضاً بعض المساوئ، أهمها أنه لا يتمتع بمواصفات جيدة لنقل الحرارة مقارنةً بالسوائل، إلا أنه بالإمكان تحسين بعضها بزيادة ضغط الغاز أثناء التبريد.

ثانياً: غاز الهيليوم (He)

يتمتع غاز الهيليوم بمواصفات أفضل مما ذكرنا لغاز ثاني أكسيد الكربون حيث إنه غاز لا يتفاعل تماماً مع المواد ويتحمل درجات حرارة عالية جداً بالإضافة إلى قلة تفاعله مع النيوترونات؛ ولهذا فإنه الغاز المرشح الوحيد لتبريد المفاعلات التي تشتغل عند درجات حرارة عالية ($600\ ^0C$ فما فوق) مما يزيد من كفاءتها (٥٠٪)، وذلك باستخدام تربينة غازية وتربينة بخارية في وقت واحد. أما العيب الوحيد لهذا الغاز فيكمن في تكلفة إنتاجه وفق التقنية الحالية.

(٢,٣,٣) المهدئ

أثناء عملية انشطار النوى الثقيلة، مثل نواة اليورانيوم ^{235}U تصدر طاقة هائلة (200 MeV) بالإضافة إلى معدل حوالي ٢,٥ من النيوترونات السريعة بطاقة تفوق واحد MeV. وتستعمل هذه النيوترونات مباشرة في عملية الانشطار المتسلسل في المفاعلات النووية السريعة، إلا أن أكثر المفاعلات النووية الحالية هي مفاعلات تعتمد على النيوترونات الحرارية (0.025 eV). ويُستخدم هذا النوع من النيوترونات الحرارية في المفاعلات، لأن لها احتمالاً أكبر لإحداث الانشطارات (مقطع عرضي انشطاري كبير، حوالي 600 barns). ولهذا الغرض تُوضع داخل قلب المفاعل مواد خفيفة خاصة لتهدئة سرعة النيوترونات الانشطارية وجعلها تتناسب أكثر لإحداث الانشطارات المتسلسلة.

ويجب أن تتوفر في المادة المهدئة للنيوترونات شروط أساسية منها:

أولاً: امتصاص قليل جداً للنيوترونات.

ثانياً: مقطع عرضي للتشتت كبير جداً.

ثالثاً: إمكانية فقدان النيوترون طاقة كبيرة جدا أثناء التصادم.

رابعاً: مواصفات جيدة لنقل الحرارة.

خامساً: قدرة عالية لتحمل ظروف قلب المفاعل من حرارة وإشعاعات وغير مسبب لتآكل المواد.

وتتوفر أكثر هذه الشروط في مادة الجرافيت والماء العادي والثقيل والبريليوم على شكل معدني أو أكسيد. لكن يندر استخدام البريليوم على الرغم من مواصفاته الجيدة بسبب التكلفة العالية لإنتاجه.

(٢,٣,٣,١) الجرافيت

يستعمل الكربون على شكل جرافيت بكثرة كمهدئ للنيوترونات في العديد من أنواع المفاعلات النووية. ويتمتع الجرافيت بمواصفات جيدة تحقق العديد من الشروط الأساسية للمواد المهدئة. ولا يمتص الجرافيت الكثير من النيوترونات، حيث إن له مقطعاً عرضياً للامتصاص صغيراً جداً (0.045 barns)، كما أن له مواصفات ميكانيكية وكيميائية جيدة وهو ناقل ممتاز للحرارة بالإضافة إلى أن سعر إنتاجه مقبول. ويُصنع الجرافيت النقي الذي يُستخدم في المفاعلات من النفط وبعد عمليات المعالجة يكتسب صفات السيراميك والمعادن في وقت واحد، حيث إنه لا يتمدد كثيراً مع ارتفاع الحرارة، وهو موصل جيد ومقاوم للصدمات أيضاً.

توجد أيضاً بعض المساوئ للجرافيت، منها أنه يتفاعل مع الأكسجين والماء وبعض المعادن، مثل الصوديوم عند درجات الحرارة العالية مما يجعله غير صالح للمفاعلات المبردة بالصوديوم السائل. وتتأثر كذلك بعض مواصفاته الميكانيكية والحرارية عند تعرضه الطويل للإشعاعات، لكن على الرغم من هذه العيوب، فإن الجرافيت أكثر المواد استعمالا كمهدئ للنيترونات في المفاعلات النووية باستثناء الماء.

(٢,٣,٣,٢) الماء

يُستعمل الماء العادي (H_2O) بعد تنقيته كمهدئ ومبرد لمفاعلات الماء المضغوط ولمفاعلات الماء المغلي، وذلك لما له من مميزات جيدة لتهدئة النيوترونات ونقل الحرارة،

بالإضافة إلى وفرته في الكثير من المناطق. يحقق الماء العادي جل شروط المواد المهدئة للنيوترونات فله مقطع عرضي لتشتت النيوترونات كبير (49 barns)، وناقل جيد للحرارة، كما سبق شرحه. لكن أبرز عيوب وجود الماء في قلب المفاعل أنه يمتص كمية من النيوترونات لا يُستهان بها (مقطعه العرضي للامتصاص يساوي 0.66 barns) مما يحتم تعويض ذلك بتخصيب قليل (٢-٥٪) للوقود النووي، ولهذا السبب فلا يصلح الماء العادي كمهدئ للمفاعلات التي وقودها اليورانيوم الطبيعي. كذلك فإن الماء يتبخر عند دراجة حرارة منخفضة نسبياً ($100\ ^0C$) مما يحتم استخدام ضغط عالٍ للمحافظة على حالته السائلة عند درجة حرارة التشغيل ($340\ ^0C$)، وعلى الرغم من كل هذا، فإن الماء العادي هو أكثر المواد استعمالاً كمهدئ ومبرد للمفاعلات النووية في العالم حالياً.

يُستعمل الماء الثقيل D_2O أيضاً كمبرد ومهدئ لبعض أنواع المفاعلات النووية لما له من خصائص مثالية فيما يخص تفاعله مع النيوترونات. ويتميز الماء الثقيل بقلة امتصاصه للنيوترونات، فمقطعه العرضي لامتصاص النيوترونات صغير جداً (0.0026 barns) ومقطعه العرضي للتشتت كبير (10.5 barns)، مما يجعله مبرداً ومهدئاً مثالياً للمفاعلات النووية؛ ولهذا السبب فالماء الثقيل هو السائل الوحيد الذي يمكن استعماله لتبريد نيوترونات المفاعلات وتهدئتها، التي تستعمل وقود اليورانيوم الطبيعي، لكن العائق الوحيد لاستعمال الماء الثقيل هو التكاليف الباهظة للمحطات الخاصة بإنتاجه. ويوجد الماء الثقيل بنسبة ضئيلة (1/7000) في الماء العادي، مما يسمح باستخلاصه من مياه البحر، أو البحيرات الطبيعية، كذلك يمكن إنتاجه من الأمونيا كمنتج ثانوي لمصانع الأسمدة.

تجدر الإشارة إلى أن إنتاج الماء الثقيل بكميات كبيرة ونسبة نقاوة عالية (٩٩,٧٥٪)، ليست بالعملية السهلة مما يجعل تكاليف محطات إنتاجه باهظة جداً. أما الدول الرائدة في إنتاج الماء الثقيل فهي كندا والهند بسبب استعمالهما لوقود اليورانيوم الطبيعي في المفاعلات النووية (كندو).

(٢,٣,٤) عواكس النيوترونات

أثناء التفاعلات الانشطارية في قلب المفاعل النووي، يمتص الوقود والمهدئ والمبرد والمواد الأخرى جل النيوترونات الصادرة عن تلك التفاعلات. وتُفقد أيضاً كمية من النيوترونات بسبب تسربها إلى خارج قلب المفاعل بدون الاستفادة منها؛ ولهذا توضع مواد خاصة حول قلب المفاعل للحد من تسرب النيوترونات لإعادتها إلى الداخل، وتسمى طبقة هذه المواد حول قلب المفاعل بالعاكس، لأنها تُوضع لعكس تجاه النيوترونات ومنعها من الانفلات والهروب. وتعتمد كفاءة العاكس على سمكه وخصائص المادة المكونة له، التي يجب أن تتوفر فيها شروط المواد المهدئة نفسها المذكورة سابقاً. وكلما كانت مادة العاكس مشتتة وغير ماصة للنيوترونات كانت أفضل؛ ولهذا فإن أفضل المواد العاكسة بالترتيب هي الماء الثقيل، والماء، والجرافيت. أما السمك المثالي للطبقة العاكسة فيُحسب وفق معادلات تغير فيض النيوترونات داخل وخارج قلب المفاعل النووي. وتؤدي هذه الحسابات إلى أن سمك العاكس المثالي لكل من الماء الثقيل والماء والجرافيت يساوي حوالي ٤٠ سنتيمتر فقط.

توضع عواكس للنيوترونات حول قلب كل المفاعلات النووية تقريباً لما في ذلك من فائدة اقتصادية كبيرة وحماية من الإشعاعات أيضاً. ويُوفر وجود عاكس حول قلب المفاعل من الكتلة الحرجة للمفاعل (كمية وقود) التي تكون عالية التكلفة مقارنة بسعر مادة العاكس. ولأسباب عملية غالباً ما يكون العاكس والمهدئ من المادة نفسها باستثناء المفاعلات السريعة التي لا تحتاج إلى مادة مهدئة أصلاً، بل يُوضع غطاء حول قلب المفاعل من المواد القابلة للانشطار لتحويلها إلى مواد انشطارية.

(٢,٤) أنواع المفاعلات النووية الانشطارية

تقسم المفاعلات النووية الانشطارية من الناحية الفيزيائية إلى قسمين، أولهما المفاعلات النووية الحرارية، والآخر المفاعلات النووية السريعة. يعتمد هذا التقسيم

المبسط على فيزياء التفاعلات النووية التي تحدث في قلب المفاعل حيث تكون جل الانشطارات النووية ناتجة عن تفاعل النيوترونات الحرارية التي لا تتجاوز طاقتها واحد إلكترون فولت (1eV) في المفاعلات النووية الحرارية. أما الانشطارات التي تحدث في المفاعلات السريعة فهي ناتجة عن تفاعل النيوترونات الانشطارية بدون تهدئة. وتتميز النيوترونات الحرارية بقدرة عالية لانشطار النوى الثقيلة مما يسمح باستخدام أنواع مختلفة من الوقود وحتى اليورانيوم الطبيعي. ولهذه الأسباب الفيزيائية، فإن الفرق الأساسي بين المفاعلات النووية الحرارية والسريعة هو وجود أو عدم وجود مواد خفيفة في قلب المفاعل لتهدئة النيوترونات الانشطارية ونوعية الوقود النووي.

وتقسم المفاعلات النووية أيضاً حسب المهدئ والمبرد أو التصميم الهندسي، لكن لكثرة هذه الأنواع ومواكبة التطورات التي حصلت على مدى الستة عقود الماضية سنقسم دراسة أنواع المفاعلات النووية الانشطارية إلى أربعة أجيال متتالية.

(٢,٤,١) مفاعلات الجيل الأول

تم تصميم وإنشاء مفاعلات الجيل الأول في حقبة الخمسينيات وبداية الستينات من القرن الماضي. ويتميز هذا النوع من المفاعلات باستعمال الوقود النووي المصنع من اليورانيوم الطبيعي. ويُنتج البلوتونيوم لأغراض تصنيع الأسلحة النووية في بعض الدول الغربية كأمريكا وبريطانيا وفرنسا والاتحاد السوفيتي السابق. واُستخدم الجرافيت أو الماء الثقيل كمهدئ للنيوترونات الانشطارية، واُستخدم ثاني أكسيد الكربون أو الماء لتبريد هذه المفاعلات النووية الحرارية. بدأت بعد ذلك محاولات للاستفادة السلمية من الطاقة النووية في إنتاج الكهرباء واستعمال المفاعل محركاً لبعض القطع البحرية الكبيرة مثل حاملات الطائرات والغواصات. وتمخضت هذه الفترة عن إنشاء مفاعلات نووية لإنتاج الطاقة الكهربائية، حيث اُستخدم وقود اليورانيوم المخصب قليلاً في أمريكا وروسيا، واُستخدم وقود اليورانيوم الطبيعي في أوروبا وكندا. وتميزت المفاعلات التي صُنعت في روسيا باستعمال الماء الخفيف للتبريد والجرافيت لتهدئة النيوترونات، أما

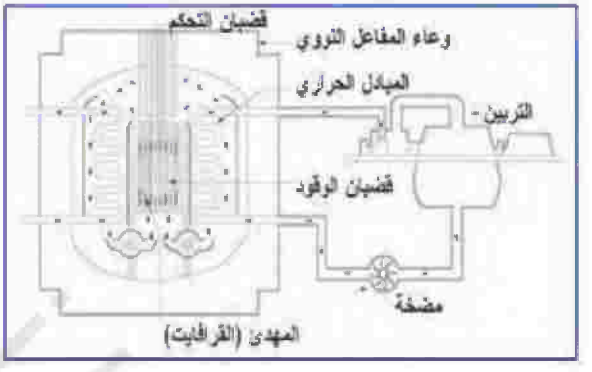
المفاعلات التي صُممت في أمريكا فاستخدمت الماء الخفيف المضغوط للتهدئة والتبريد في وقت واحد. كذلك تميزت المفاعلات التي صُممت في أوروبا باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون للتبريد والجرافيت لتهدئة النيوترونات، أما المفاعلات الكندية فاستعملت الماء الثقيل للتهدئة والتبريد.

(٢,٤,٢) مفاعلات الجيل الثاني

تطوَّرت مفاعلات الجيل الأول في منتصف الستينات من القرن الماضي لتدخل المرحلة التجارية، ويصبح لها دور فعَّال في إنتاج الكهرباء ولا تزال هذه المفاعلات إلي اليوم في الخدمة؛ ولهذا سنتطرق إلى شرح بعض التفاصيل والفروقات المهمة بين أنواع هذه المفاعلات النووية الانشطارية.

(٢,٤,٢,١) المفاعلات المبردة بالغاز (GCR)

قامت بريطانيا وفرنسا بإنشاء برنامج طموح لسد حاجات الطلب المتزايد عن الكهرباء في الستينيات بإنشاء العديد من محطات القدرة النووية التي تستخدم المفاعلات النووية المبردة بالغاز. ويستعمل غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) لتبريد هذا النوع من المفاعلات والجرافيت لتهدئة النيوترونات الانشطارية. وتستخدم هذه المفاعلات وقود اليورانيوم الطبيعي على حالته المعدنية مغلفاً بسبيكة من المغنيسيوم؛ ولهذا سمي "بالماقنوكس" (Magnox). ولقد تم تطوير هذا النوع من المفاعلات لرفع كفاءته ليصبح ما يسمى بمفاعل الغاز المتقدم (AGR)، الذي يشتغل تحت ضغط أكبر (600 psi)، ودرجة حرارة عالية ($600\ ^0C$). ولتفادي التأثيرات السلبية للغاز الحار عن غلاف الوقود تم تعويض اليورانيوم الطبيعي بثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) المخصب بنسبة (٢-٣٪)، وتغليفه بالحديد غير قابل للصدأ. ويتحكم في المفاعل عن طريق إدخال أو إسقاط قضبان التحكم الماصة جداً للنيوترونات، وإضافة غاز النيتروجين إلى غاز التبريد عند الحاجة. يوضح الشكل رقم (٢,٤) مفاعل الغاز المتقدم الذي لا يزال في الخدمة في بريطانيا حتى اليوم.



الشكل رقم (٢,٤). المفاعل النووي المبرد بغاز ثاني أكسيد الكربون (AGR) [٢٥].

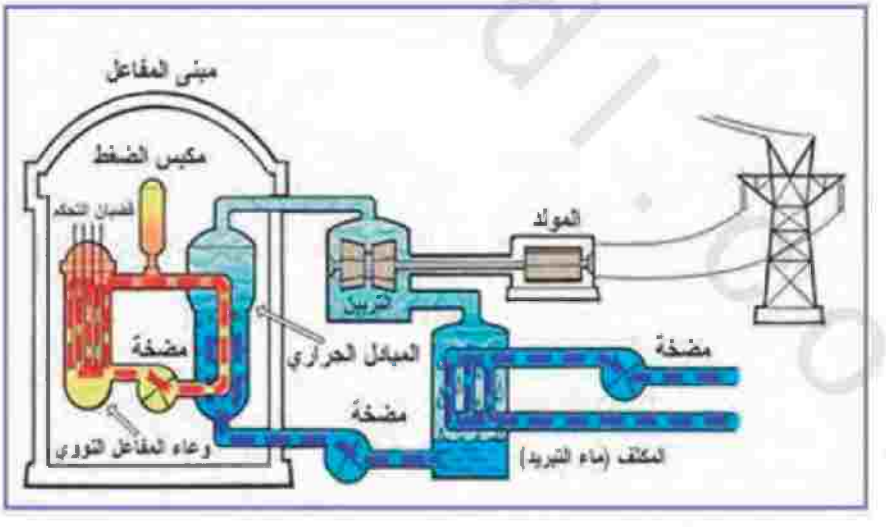
(٢,٤,٢,٢) مفاعل الماء المضغوط (PWR)

صُممت مفاعلات الماء المضغوط شركة "واستينق – هاوس" الأمريكية لأغراض النقل البحري ودفع القطاعات البحرية والغواصات في البداية، وبعد ذلك طوَّرت هذه الشركة هذا النوع من المفاعلات لإنتاج الطاقة الكهربائية. وأصبح هذا النوع من المفاعلات أكثر رواجاً في العالم اليوم، حيث يوجد في العديد من الدول الآسيوية والأوروبية من بينها فرنسا التي تحولت إلى استخدام هذا النوع من المفاعلات في أواخر سبعينات القرن الماضي.

يُستخدم هذا النوع من المفاعلات الماء العادي لتهدئة النيوترونات والتبريد وصُممت له دائرتان منفصلتان مما يساعد على الحد من خطر التلوث الإشعاعي. ويُستعمل الماء في الدائرة الأولى المغلقة للتبريد وتهدئة النيوترونات الانشطارية في وقت واحد. ويكون الماء في هذه الدائرة تحت ضغط عالٍ (2250 psi) للمحافظة على الحالة السائلة للماء الذي تصل حرارته إلى (325 ^{0}C) درجة. أما الدائرة الثانية فتكون تحت ضغط أقل مما يسمح لغليان الماء وتكوين البخار الذي ينتجه بكميات كبيرة لتشغيل التربينة فمولد الكهرباء. بعد ذلك يمر خليط البخار والماء بالمكثف ليصبح سائلاً ويعود من جديد للمبادر الحراري.

يتميز قلب مفاعل الماء المضغوط بصغر حجمه الذي لا يتجاوز قطره ٣,٥ أمتار وارتفاعه ٣,٥-٤ أمتار ويحتوي على حوالي ١٥٠-٢٥٠ حزمة من مواسير الزركونيوم Zr المغلقة بإحكام ومملوءة بأقراص وقود اليورانيوم المخصب بنسبة ٣-٥٪. وتتكون كل حزمة من حوالي ٢٠٠-٣٠٠ قضيب وقود تُوضع عمودياً وتتخللها فراغات لمرور الماء وقضبان التحكم. يصل الوزن الإجمالي لقلب المفاعل إلى حوالي ٨٠-١٠٠ طن من اليورانيوم يُجدد ثلثه كل سنة.

يتم التحكم في المفاعل عن طريق نسبة تركيز البورون في ماء الدورة الأولى وعن طريق قضبان التحكم. وتتكون هذه القضبان من مواد لها قدرة عالية على امتصاص النيوترونات، مثل سبائك الفضة، والأنديوم، والكاديوم (Ag-In-Cd)، أوكربايد البورون (B_4C). وتكون قضبان التحكم أثناء التشغيل فوق قلب المفاعل ويدخل أجزاء منها في حزم الوقود عند الحاجة أوكلها لإيقاف المفاعل تماماً. يوضح الشكل رقم (٢,٥) الأجزاء المهمة لمفاعل الماء المضغوط.

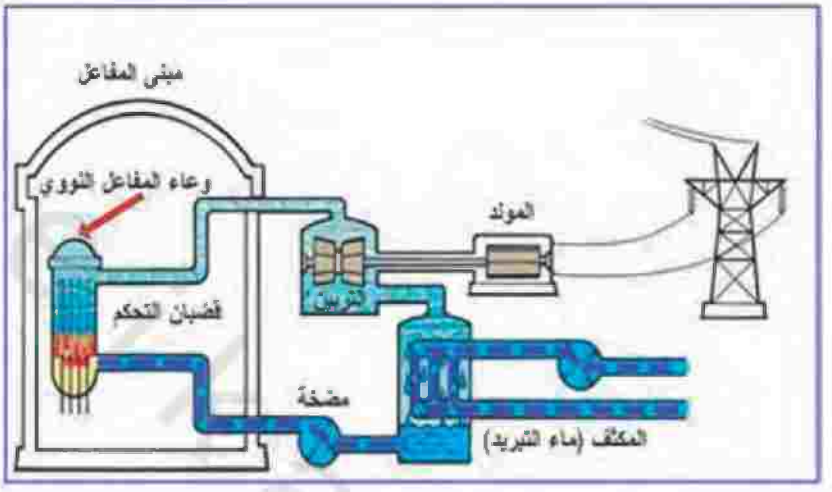


الشكل رقم (٢,٥). مفاعل الماء المضغوط (PWR)[٣٤].

(٢,٤,٢,٣) مفاعلات الماء المغلي (BWR)

أُنشئت مفاعلات الماء المغلي أيضاً بأمريكا، وتُعد ثاني أنواع المفاعلات النووية رواجاً في العالم. تستخدم هذه المفاعلات الماء العادي أيضاً للتبريد وتهدئة النيوترونات الانشطارية، ولا توجد اختلافات مهمة من الناحية الفيزيائية بين هذا النوع من المفاعلات ومفاعلات الماء المضغوط. ويتميز مفاعل الماء المغلي بدائرة واحدة تحت ضغط حوالي (1000 psi)، مما يسمح للماء أن يغلي عند درجة حرارة (285 °C) فتتحول ما نسبته ١٢-١٥٪ من الماء إلى بخار مشبع في أعلى الوعاء. بعد ذلك يمر البخار بلوحات التجفيف قبل أن يتجه مباشرة إلى التربينة ثم المكثف فيتحول إلى سائل ويعود بواسطة مضخات إلى قلب المفاعل من جديد؛ ولهذا تحتاج غرف التربينات إلى حواجز إشعاعية للحماية بسبب الدورة الواحدة وإمكانية تشبع الماء خلال مروره بقلب المفاعل. لكن عادة ما تكون كمية الإشعاع المكتسبة قليلة بالإضافة إلى أن عمر نصف المادة المشعة (^{16}N) صغير (٧ ثوانٍ)، مما يسمح بصيانة التربينة بعد توقفها بفترة غير طويلة.

يستخدم مفاعل الماء المغلي نفس الوقود (UO_2) الذي يستخدمه مفاعل الماء المضغوط ولهذين المفاعلين أوجه تشابه كثيرة، لكن تجدر الإشارة إلى بعض الاختلافات حتى وإن كانت بسيطة. ومن بين هذه الاختلافات مواقع قضبان التحكم التي تكون في أسفل الوعاء لا فوق قلب المفاعل كما هو الحال بالنسبة لمفاعل الماء المضغوط. كذلك تُستخدم كمية الماء المتدفقة أو بالأحرى كمية البخار في المفاعل للمساهمة في التحكم أيضاً؛ لأن البخار له قدرة أقل من الماء لتهدئة النيوترونات. وعادة ما تكون تكلفة مفاعل الماء المغلي أقل بسبب وجود دورة واحدة وسمك أقل لوعاء المفاعل الذي يصنع أيضاً من الحديد المبطن بطبقة من الحديد غير قابل للصدأ. يوضح الشكل رقم (٢,٦) أهم أجزاء مفاعل الماء المغلي (BWR).



الشكل رقم (٢,٦). مفاعل الماء المغلي (BWR) [٣٤].

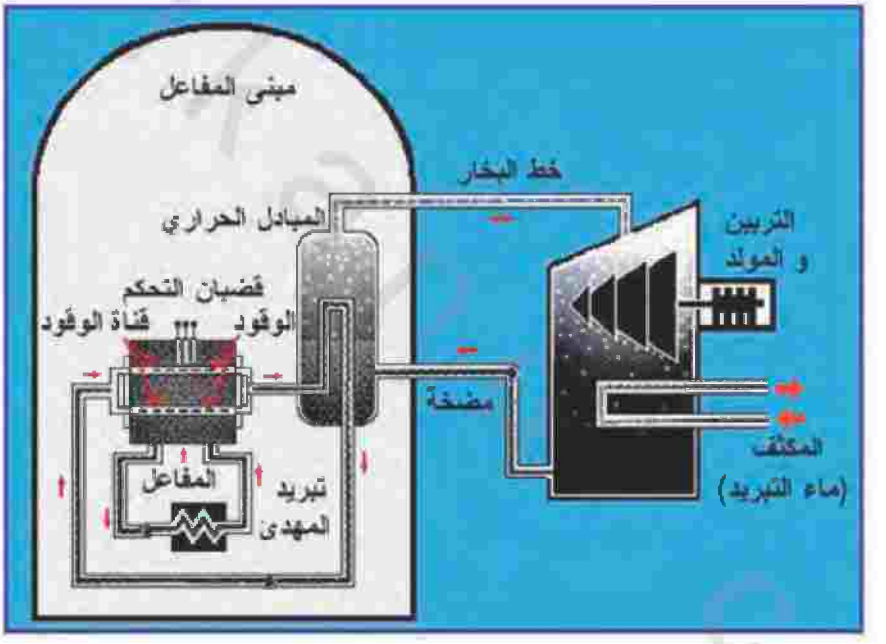
(٢,٤,٢,٤) مفاعلات الماء الثقيل المضغوط (PHWR-Candu)

نشأت مفاعلات الماء الثقيل في كندا وتميزت باستعمال اليورانيوم الطبيعي (U_N) مما جعلها جاذبة لبعض الدول التي لا تملك التقنية الكافية لتخصيب اليورانيوم، مثل الهند، وباكستان، وغيرهما. يحتاج هذا النوع من الوقود إلى مهدئ له كفاءة عالية مما يحتم استعمال الماء الثقيل (D_2O) الذي تكلفة إنتاجه باهظة أيضاً. ويحتوي مفاعل الماء المضغوط (PHWR) على دورتين كما هو الحال في مفاعلات الماء المضغوط (PWR)، إلا أن الدورة الأولى تستخدم الماء الثقيل لتبريد قلب المفاعل وتهدئة النيوترونات الانشطارية في آن واحد.

يتكون قلب المفاعل من وعاء للماء الثقيل، قطره سبعة أمتار، وارتفاعه أربعة أمتار، تتخلله ٣٨٠ قناة أفقية (كلوندريا)، توضع فيها أنابيب حزم الوقود، التي يصل وزنها الإجمالي إلى حوالي ١٠٠ طن من ثاني أكسيد اليورانيوم الطبيعي (UO_2).

يدخل الماء الثقيل (تحت ضغط عالٍ 1450psi وحرارة ٢٦٥ درجة) أنابيب حزم الوقود فترتفع حرارته إلى حوالي ٣٠٠ درجة ثم يتجه إلى المبادل الحراري.

يتم التحكم في المفاعل عن طريق قضبان التحكم التي تخترق القنوات عمودياً أو بإضافة مواد ماصة للنيوترونات في الماء الثقيل مثل محلول نيترات القدولنيوم. يوضح الشكل رقم (٢,٧) أهم أجزاء مفاعل الماء الثقيل المضغوط (PHWR).



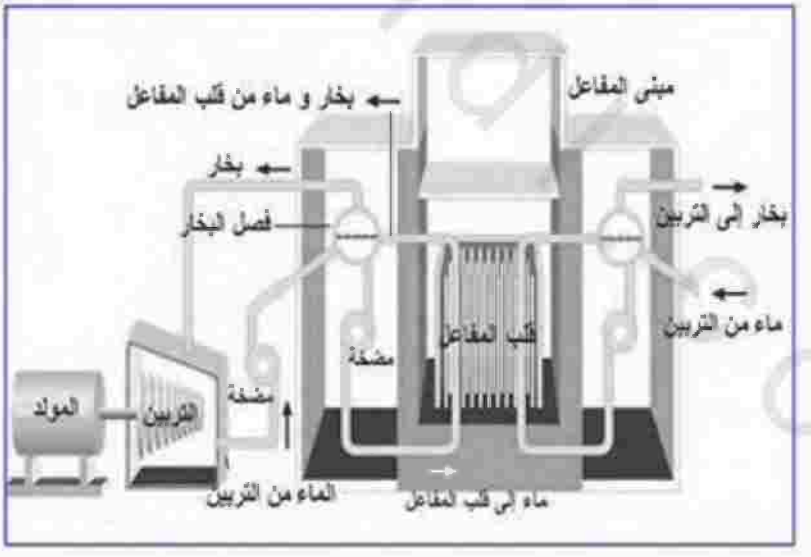
الشكل رقم (٢,٧). مفاعل الماء الثقيل المضغوط (PHWR) [٢٥].

(٢,٤,٢,٥) مفاعل الماء الخفيف والجرافيت (RBMK)

صُممت وشُيدت مفاعلات الماء الخفيف والقرانايت في الاتحاد السوفيتي السابق، وانتشرت في بعض الدول القليلة المجاورة له. يتكون قلب المفاعل من مجموعة

حوالي ١٦٠٠ عمود مربع (٠,٢٥×٠,٢٥ متر) طول كل منها ٧ أمتار توضع عمودياً يتخللها قنوات أنابيب وقود ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) المخصب بنسبة ١,٨-٢٪ والماء العادي للتبريد تحت ضغط حوالي (1000 psi) مما يجعل الماء يغلي عند درجة الحرارة ٢٤٠ درجة في أعلى قلب المفاعل كما هو الحال في مفاعلات الماء المغلي (BWR)

يساوي الوزن الإجمالي للوقود حوالي ٢٠٠ طن من اليورانيوم توضع على شكل حزم متقابلة طول كل منها ٣,٤ أمتار داخل أنابيب الضغط. يتم التحكم في المفاعل عن طريق حوالي ٢٢٢ قضيباً من المواد الماصة للنيوترونات، مثل البورون كربايت (B_4C). يوضح الشكل رقم (٢,٨) الأجزاء العامة لمفاعل الماء الخفيف والجرافيت (RBMK).



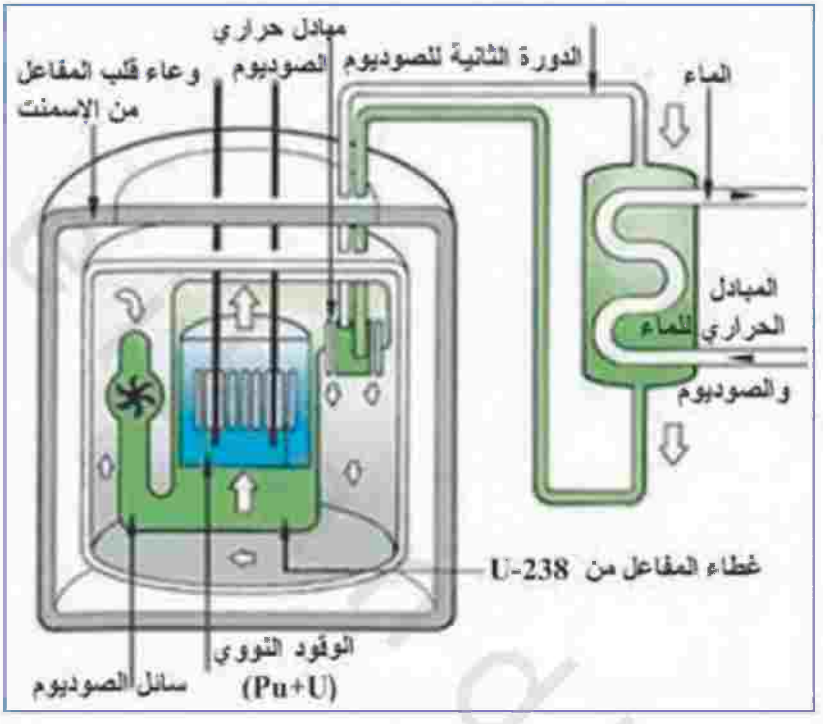
الشكل رقم (٢,٨). مفاعل الماء الخفيف والجرافيت (RBMK) [٢٩].

(٢,٤,٢,٦) المفاعلات المولدة السريعة (FBR)

صممت الدول النووية المفاعلات المولدة السريعة للبحث والتجارب لما لها من آمال كبيرة في هذه المفاعلات لاستهلاك البلوتونيوم المنتج في المفاعلات الحرارية بالإضافة إلى أنها قادرة على توليد أكثر مما تستهلك من المواد الانشطارية. ويعتمد هذا النوع من المفاعلات على استخدام النيوترونات الانشطارية السريعة دون تهدئتها ؛ ولهذا لا يجوز استعمال مواد خفيفة في قلب المفاعل، الأمر الذي أدى إلى استخدام بعض الفلزات المعدنية لتبريد المفاعل. وتبين أن أفضل هذه الفلزات هو الصوديوم (ينصهر عند ١٠٠° ويغلي عند ٩٥٠°) لتبريد المفاعلات ونقل الحرارة إلى المبادل الحراري لتبخير الماء الذي يشغل التربينة فالمولد الكهربائي. ولهذا السبب فإن لهذا النوع من المفاعلات دورتين مغلقتين تحتوي الأولى على سائل الصوديوم، والثانية على الماء لإنتاج البخار في المبادل الحراري بطريقة غير مباشرة بين السائلين، علما أن الصوديوم يتفاعل كيميائياً بشدة مع الماء.

يستخدم في هذا النوع من المفاعلات وقود يتكون من خليط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم ($UO_2 + PO_2$) واليورانيوم المنضب (^{238}U) بنسبة ٨٠٪ ثم يُغلف بالحديد غير قابل للصدأ. تتم عملية توليد البلوتونيوم في المفاعل عن طريق امتصاص النيوترونات باليورانيوم (^{238}U) الموجود في الوقود وغطاء (غلاف) قلب المفاعل.

لم تصل هذه المفاعلات لأسباب عديدة إلى مرحلة إنتاج كميات تجارية كبيرة من الكهرباء ما عدا المفاعل الروسي BN بقدرة (600MW) والمفاعل الفرنسي سوبر فينكس بقدرة (1300 MW) اللذين تخطيا المرحلة التجريبية. يوضح الشكل رقم (٢,٩) أحد أنواع المفاعلات المولدة السريعة.



الشكل رقم (٢,٩). المفاعلات المولدة السريعة (FBR) [٣٧].

(٢,٤,٣) مفاعلات الجيل الثالث

واصلت الدول النووية في حقبة الثمانينات والتسعينات من القرن الماضي تطوير مفاعلات الجيل الثاني التي لا تزال في الخدمة إلى اليوم، وسُميت هذه المفاعلات المتطورة بالمفاعلات المتقدمة أو مفاعلات الجيل الثالث. وأثناء تصميم هذه المفاعلات تمت الاستفادة من الخبرة المتراكمة في تشغيل مفاعلات الجيل الثاني وأُدخلت تعديلات جوهرية لسلامة محطات القدرة النووية وأخرى خاصة بنوع الوقود وخفض تكلفة الإنشاء والتشغيل، وأهم المميزات الأساسية التي أسست عليها مفاعلات الجيل الثالث ما يلي:

أولاً: خفض احتمال حادث انصهار قلب المفاعل والحد من التأثيرات الإشعاعية على البيئة.

ثانياً: تبسيط التصاميم لفائدة الإنشاء والتشغيل.

ثالثاً: تحسين كفاءة حرق الوقود وتقليل النفايات.

رابعاً: خفض تكلفة الطاقة الكهربائية المنتجة.

خامساً: تمديد عمر تشغيل محطات القدرة النووية إلى ستين سنة.

أدخلت الدول الرائدة في التقنية النووية بعض التحسينات على مفاعلات الجيل الثاني، فقامت الشركات الأمريكية بتحسينات عديدة لمفاعل الماء المغلي والماء المضغوط والمفاعلات المولدة السريعة. ولا تزال بعض هذه التحسينات في مرحلة المراجعة والموافقة من السلطات المعنية، إلا أن بعضها تجاوز ذلك ليصل إلى مرحلة الإنشاء. وبالتعاون مع شركات يابانية تم إنشاء محطتين متقدمتين لمفاعل الماء المغلي (ABWR) في أواخر التسعينات ومحطات أخرى قيد الإنشاء أو مقترح إنشاؤها في أمريكا وبعض الدول الآسيوية، مثل تايوان، وكوريا الجنوبية. كذلك تمت الموافقة على بعض التصاميم، مثل (PA100-PA600) الخاصة بمفاعلات الماء المضغوط والمفاعلات المتقدمة (APWR) ومن المتوقع أن تبدأ مرحلة إنشائها قريباً في كل من كوريا الجنوبية وأمريكا وبعض الدول الغربية. أما المفاعلات المولدة السريعة فلا تزال في أمريكا في مرحلة التطوير والتصميم.

قامت بعض الشركات الأوروبية منها الفرنسية والألمانية بتحسينات لمفاعل الماء المضغوط ليصبح أقل تكلفة بالإضافة، إلى أنه يستعمل وقوداً جديداً يسمى موكس (MOX)، وهو خليط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم بنسبة ٧-١٠٪ ولقد بدأت المرحلة الفعلية لإنشاء مفاعلات الجيل الثالث الأوروبية للماء المضغوط المتقدمة (EPR) في فنلندا وفرنسا.

صممت روسيا أيضاً مفاعل الماء المضغوط المتقدم (VVER-1000) ونجحت في ترويجه لبعض الدول، مثل الهند، والصين، وإيران، ومن المتوقع إنشاء محطات مماثلة في روسيا قريباً لتعويض محطاتها القديمة. كذلك طوَّرت روسيا مفاعلها المولد السريع (FBR) وتم تصميم المفاعل السريع المتقدم (BN800) الذي يستخدم وقود خليط أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم، مما سيمكنها من استهلاك كميات البلوتنيوم الكبيرة المفككة من أسلحتها النووية حسب اتفاقيات الحد من التسلح النووي.

طوَّرت كندا والهند، كلٌّ على حدة، مفاعل الماء الثقيل للجيل الثاني، فأسست كندا مفاعل كندو المتقدم (ACR)، الذي بإمكانه استعمال وقود اليورانيوم الطبيعي أو المخصب قليلاً باليورانيوم (^{235}U) والبلوتونيوم (Pu) واستعمال الماء الثقيل لتهدئة النيوترونات والماء العادي المضغوط للتبريد. أما الهند فتعمل على تطوير مفاعل الماء الثقيل المتقدم (AHWR)، الذي يستعمل وقود التوريوم واليورانيوم (U+Th) أو الثوريوم والبلوتونيوم (PU+Th) والماء الثقيل لتهدئة النيوترونات والماء العادي المضغوط للتبريد بالإضافة إلى بعض التحسينات في جوانب أخرى.

تُركز كثير من الدول النووية من بينها جنوب أفريقيا بتطوير المفاعلات المبردة بغاز الهيليوم عند درجة حرارة عالية (٨٥٠°) لما في ذلك حل لمشاكل التآكل ورفع كفاءة المفاعل باستخدام توربينة غازية وثانية بخارية في وقت واحد. وتمتاز المفاعلات المبردة بغاز الهيليوم الشديد الحرارة (HTGCR) بإمكانية استعمال العديد من أنواع الوقود النووي المخصب باليورانيوم أو البلوتونيوم. كذلك يمكنها حرق وقود خليط الثوريوم واليورانيوم أو البلوتونيوم. ولا تزال التحسينات كثيرة في مجال نوع وشكل الوقود والمهدئ لهذا النوع من المفاعلات إلا أنها لم تصل إلى مرحلة الإنشاء والرواج التجاري حتى اليوم.

(٢,٤,٤) مفاعلات الجيل الرابع

لقد تم في سنة ٢٠٠١م إنشاء مجموعة عشر دول نووية (GIF) لغرض توحيد جهود البحث واختيار أفضل أنواع مفاعلات الجيل الرابع لمحطات القدرة النووية لسد الاحتياجات العالمية المتزايدة من الطاقة في المستقبل. ولا تزال مفاعلات الجيل الرابع على شكل تحسينات لمفاعلات الجيل الثالث، ومن المتوقع ألا تدخل حيز التنفيذ والتشييد قبل سنة ٢٠٢٠م. وبعد جملة من التشاورات واجتماعات المتخصصين من هذه الدول تم الاتفاق سنة ٢٠٠٥م على اختيار ستة أنواع من المفاعلات، ستُكثف الجهود في تصميمها والبحث في إمكانية إنشائها، وأهم المميزات الأساسية التي تتسم بها مفاعلات الجيل الرابع ما يلي:

أولاً: أكثرها تشتغل عند درجة حرارة عالية لإنتاج الطاقة الكهربائية والهيدروجين والاستفادة من الحرارة لأغراض أخرى.

ثانياً: أقل تكلفة من المحطات السابقة في الإنشاء والتشغيل والصيانة.

ثالثاً: المحافظة على سلامة البيئة بقلة إنتاج النفايات طويلة العمر.

رابعاً: حرق الوقود النووي المخصب باليورانيوم والبلوتونيوم وحرق نفايات الأكتنايد (Ac).

خامساً: نظم جديدة في التحكم باستخدام النظام السلبي بدون تدخل مثل الجاذبية والخواص الفيزيائية للمواد لتفادي الحوادث.

سنعطي فيما يلي فكرة مبسطة عن مفاعلات الجيل الرابع الستة المقترحة للبحث والتطوير.

(٢,٤,٤,١) المفاعلات السريعة المبردة بالغاز (GCFR)

سيستعمل هذا المفاعل السريع غاز الهيليوم عند درجة حرارة عالية (٨٥٠°) ووقود اليورانيوم المخصب وكل المواد الانشطارية الأخرى لإنتاج الكهرباء عن طريق التربينات الغازية وإنتاج الهيدروجين، أو التطبيقات الحرارية الأخرى.

(٢,٤,٤,٢) المفاعلات السريعة المبردة بالرصاص المنصهر (LCFR)

سيستعمل هذا المفاعل السريع سائل الرصاص، أو الرصاص والبزموث عند درجة حرارة عالية (٨٠٠°) ووقود اليورانيوم المخصب والمواد الانشطارية الأخرى الناتجة عن معالجة وقود المفاعلات السابقة لإنتاج الكهرباء والتطبيقات الحرارية الأخرى أيضاً.

(٢,٤,٤,٣) مفاعلات الملح المنصهر (MSR)

سيستعمل هذا المفاعل اليورانيوم المذاب في سائل تبريد فلوريد الصوديوم عند درجة حرارة عالية (٧٠٠-٨٠٠°). يمر خليط الوقود المبرد داخل قنوات الجرفيت وتتم إزالة نواتج الانشطار أثناء التشغيل وإعادة اليورانيوم والبلوتونيوم وعناصر الأكتيناید الأخرى للوقود. وتستخدم دائرة ثانوية لإنتاج الكهرباء والهيدروجين.

(٢,٤,٤,٤) المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم (SCFR)

هذا النوع من المفاعلات نسخة مطورة من المفاعلات السريعة الحالية مع بعض التحسينات للجوانب المهمة، مثل الوقود والسلامة.

(٢,٤,٤,٥) مفاعلات الماء عالي الضغط (SWCR)

هذا النوع من المفاعلات نسخة مطورة عن مفاعلات الماء المضغوط للجيل الثالث، إلا أنه يستخدم دورة واحدة يكون فيها الماء فوق النقطة الحرجة (ضغط 25Mpa ودرجة حرارة ٥١٠-٥٥٠°) لتبريد المفاعل وتشغيل التربينة لإنتاج الكهرباء، أما الوقود المستعمل فهو خليط ثاني أكسيد المواد المخصبة والانشطارية (موكس)، وفق نسب مختلفة. كذلك أُضيفت تحسينات خاصة من ناحية السلامة باستخدام النظام السلبي.

(٢,٤,٤,٦) المفاعلات المبردة بالغاز عالي الحرارة (VHTGR)

هذا النوع من المفاعلات نسخة مطورة من المفاعلات الحرارية المبردة بغاز الهيليوم، الذي سيعمل عند درجة حرارة عالية جداً (١٠٠٠°) لرفع كفاءة المفاعل

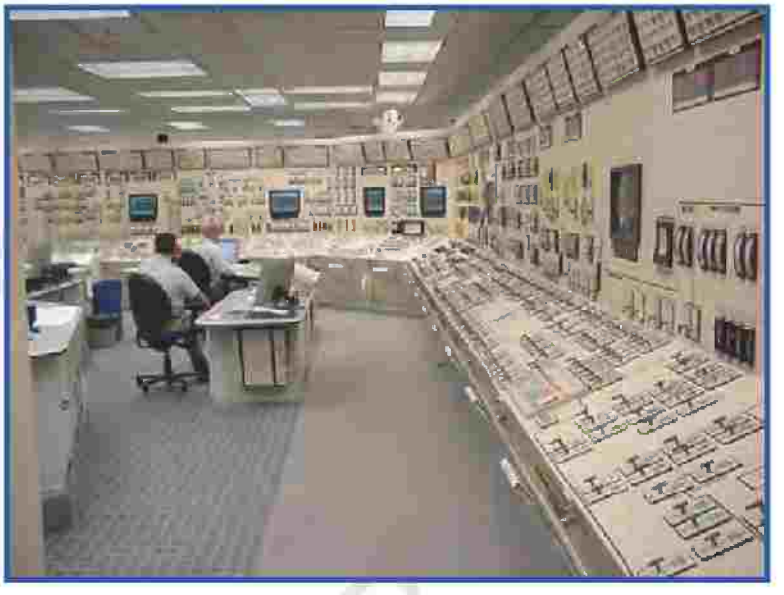
لإنتاج الكهرباء واستخدامات أخرى للحرارة. يكون قلب المفاعل على شكل كتل للقرافات داخلها قنوات للوقود ووعاء لكريات صغيرة من القرافات تحتوي على ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) المغلف بالسليكون كارباید والبايروليتك كربون.

(٢,٥) التحكم في المفاعلات النووية

يتم التحكم في محطة القدرة النووية عن طريق أجهزة القياس والمراقبة لسير العمليات الفزيائية والكميائية في كل لحظة لأهم مناطق المحطة، وتظهر هذه المعلومات بعد جمعها وتحليلها بمساعدة الحاسب الآلي على شكل صور وإشارات وقراءات في غرفة التحكم التي منها تُدار كل عمليات التدخل وتشغيل المحطة بطريقة أتوماتيكية وشبه أتوماتيكية ويدوية.

(٢,٥,١) غرفة التحكم

تحتوي غرفة التحكم كما هو موضح في الشكل رقم (٢,١٠) على جميع الأدوات اللازمة للمراقبة والتحكم في عمليات التشغيل والتدخل لسلامة المحطة والبيئة. تظهر المعلومات على شاشات ولوحات الإشارات وأجهزة التسجيل في غرفة التحكم لمساعدة المهندسين والفنيين لاتخاذ القرارات السليمة لتشغيل المحطة. ومن بين هذه المعلومات قياسات الحرارة والضغط والتدفق وسرعة التربينة وكمية القدرة الكهربائية المنتجة ومستواها، كما هو الحال في محطات القدرة الكهربائية التقليدية بالإضافة إلى مجموعة من المعلومات الخاصة بالمفاعل النووي، مثل قياس فيض النيوترونات، ومواقع قضبان التحكم، والمستوى الإشعاعي في شتى مناطق مبنى المفاعل. كذلك لمساعدة الفنيين توضع منبهات ضوئية وصوتية للتشغيل، واستعمال أدوات التحكم المتاحة، لمعالجة بعض الحالات الطارئة؛ ولهذا سنركز على بعض الأجهزة الخاصة بالقياسات، وأدوات التحكم للمفاعل النووي.



الشكل رقم (٢,١٠). غرفة التحكم في المفاعل [٣٦].

(٢,٥,٢) قضبان التحكم وأجهزة القياس الإشعاعي

(٢,٥,٢,١) قضبان التحكم

تتوزع قضبان التحكم في مواقع مختلفة من قلب المفاعل حسب أنواعها الثلاثة: قضبان منظمة، وقضبان للضبط، وقضبان للسلامة. تُستعمل القضبان المنظمة للتحكم الدقيق، وقضبان الضبط للتعديلات الكبيرة، أما قضبان السلامة فتُستعمل عند التغيرات السريعة والمفاجئة لمستوى قدرة المفاعل. كذلك تُستعمل أحياناً بعض المواد الماصة (السامة) للنيوترونات في سائل التبريد مع القضبان للتحكم في المفاعل. وتُستعمل كل أنواع التحكم السابقة لإخماد التفاعلات النووية بسرعة في قلب المفاعل عند الحالات الخطرة الطارئة. تحتوي قضبان التحكم على مواد لها قدرة كبيرة على امتصاص النيوترونات، مثل البورون (B)، والكادميوم (Cd)، والهلفنيوم (Hf)،

والقدلنيوم (Gd)، والسمريوم (Sm) ... ولقضبان التحكم أشكال وأبعاد مختلفة ويتم التحكم في حركتها عن طريق محركات كهربائية. ومحركات غازية، وكذلك الاستفادة من قانون الجاذبية أثناء إسقاطها داخل قلب المفاعل؛ ولهذا يجب أن تتوافر في سبائك قضبان التحكم المواصفات الآتية:

أولاً: قدرة عالية على امتصاص النيوترونات.

ثانياً: مقاومة التآكل وموفرة بأسعار مقبولة.

ثالثاً: تحمل الحرارة والظروف الإشعاعية داخل قلب المفاعل.

رابعاً: خفيفة الوزن مما يمكنها من الحركة السريعة.

خامساً: المحافظة على كل هذه المواصفات في مختلف الظروف.

(٢,٥,٢,٢) أجهزة القياس

تختلف أجهزة قياس الإشعاع حسب نوع الإشعاع النووي والغرض من القياسات، فالإشعاعات المؤينة، مثل أشعة ألفا وبيتا يمكن الكشف عنها مباشرة، أما أشعة جاما والنيوترونات فهي غير مؤينة مباشرة وتحتاج إلى طرائق كشف غير مباشرة بمعنى استعمال مادة تتفاعل معها فتولد إشعاعات يمكن الكشف عنها. كذلك يُحدد الغرض من القياسات نوعية الأجهزة وطرائق أخذ القراءات باستمرار أو دورياً. موضوع أجهزة الكشف عن الإشعاع وطرائق اختيارها وتشغيلها لا يمكن التطرق له في هذا الفصل؛ ولهذا ننصح القارئ بالرجوع إلى كتابنا: (هندسة الإشعاع النووي) للحصول على المعلومات الكافية في هذا المجال. ويمكن تلخيص كواشف الإشعاعات كما يلي:

أولاً: الكاشفات الغازية (غرفة التأمين، عداد جيجرميلار، وخاصة العداد التناسبي، وغرفة الانشطار للكشف عن النيوترونات).

ثانياً: الكاشفات الوميضية (صالحة لكل أنواع الإشعاعات).

ثالثاً: الكاشفات شبه الموصلة (غير صالحة للكشف عن النيوترونات).

رابعاً: الكاشفات الحروضوئية (مفيدة خاصة لقياس الجرعات الإشعاعية).

تستخدم جل هذه الكاشفات مع دوائرها الكهربائية والإلكترونية مكونة أجهزة دقيقة تُوضع داخل قلب المفاعل، وفي أماكن عديدة في مبنى المفاعل. وتحلل قياسات هذه الأجهزة الحساسة لتكوين صورة وفكرة واضحة عما يحصل في قلب المفاعل، وعرضها على شاشات ولوحات الإشارات في غرفة التحكم.

(٢,٥,٣) سلامة المحطة والبيئة

تعود مسئولية سلامة المحطة إلى طقم المشغلين لها من مهندسين وفنيين ومسئولين إداريين. وتحتم هذه المسئولية الجماعية تفاني لكل فرد بالقيام بواجبه على أحسن وجه لإتمام أداء وظيفة المحطة بكل سلامة. أما سلامة العاملين بالمحطة وسلامة البيئة من الأخطار الإشعاعية فيتم عن طريق طاقم خاص لسلامة العاملين والبيئة من الإشعاعات المؤذية. يقوم أفراد هذه المجموعة باستمرار بقياسات لكميات الإشعاع في شتى مناطق المحطة بالإضافة إلى مراقبة كل ما يتسرب من مواد (غاز- سائل- صلب) من المحطة إلى البيئة. كذلك يقوم هذا الطاقم بقياسات تأثير الإشعاعات البيولوجية عن النباتات والحيوانات والإنسان داخل المحطة وخارجها. وتُدون كل نتائج هذه القياسات وغالباً ما ترفق دورياً تقاريرها إلى السلطات المحلية.

(٢,٦) تمارين

١- اذكرْ أهم المكونات الأساسية لمحطات القدرة النووية، ثم اشرحْ باختصار أهمية كل منها.

٢- اشرح الخطوات الأساسية لتحويل الطاقة النووية إلى طاقة كهربائية في محطات القدرة النووية.

٣- عرِّف كُلاً من المهدئ وعواكس النيوترونات للمفاعلات النووية الحرارية، ثم اشرحْ دور كل منها.

٤- اشرح الفرق الأساسي بين المواد الانشطارية والمواد القابلة للانشطار وأعطِ مثالاً لكل منها.

٥- اذكرْ أهم مكونات الوقود النووي والمميزات الأساسية التي يجب توافرها فيه.

٦- اذكرْ أهم خصائص مواد التبريد المستعملة في المفاعلات النووية. وما أكثر المواد السائلة والغازية استعمالاً لهذا الغرض؟ ولماذا؟

٧- بماذا تميزت المفاعلات النووية للجيل الأول، وما كانت الأغراض الأساسية لها؟

٨- ما هي الفروق الأساسية بين المفاعلات النووية للجيل الأول والثاني ومدى انتشار هذه الأخيرة في العالم؟

٩- ما مدى انتشار المفاعلات النووية للجيل الثالث، وما أهم مميزاتها؟

١٠- اذكر المميزات الأساسية التي ستتميز بها المفاعلات النووية للجيل الرابع وأهم أنواعها.

obeikandi.com