جامعة السودان للعلوم والتكنلوجيا
كلية الدراسات العليا

إستعراض أدبيات محاسن ومساوي مفاعلات الماء الخفيف

A Review of Advantage and Disadvantages Reactors

بحث تكميلي لنيل درجة الماجستير في الفيزياء(النووية)

إعداد:
مصطفى يوسف مصطفى عبدالرحمن
إشراف :
د. أحمد الحسن الفكي

2016

الإستهلال

بسم الله الرحمن الرحيم

الَّذِي خَلَقَ لَكُم مَّا فِي الأَرْضِ جَمِيعًا ثُمَّ اسْتَوَى إِلَى
السَّمَاء فَسَوَّاهُنَّ سَبْعَ سَمَاوَاتٍ وَهُوَ بِكُلِّ شَيْءٍ عَلِيمٌ (29)
رَبُّكَ لِلْمَلائِكَةِ إِنِّي جَاعِلٌ فِي الأَرْضِ خَلِيفَةً قَالُواْ
هَا مَن يُفْسِدُ فِيهَا وَيَسْفِكُ الدِّمَاء وَنَحْنُ نُسَبِّحُ بِحَمْدِكَ
نُقَدِّسُ لَكَ قَالَ إِنِّي أَعْلَمُ مَا لاَ تَعْلَمُونَ (30) وَعَلَّمَ آدَمَ
كُلَّهَا ثُمَّ عَرَضَهُمْ عَلَى الْمَلائِكَةِ فَقَالَ أَنبِئُونِي بِأَسْمَاء
هَؤُلاء إِن كُنتُمْ صَادِقِينَ (31) قَالُواْ سُبْحَانَكَ لاَ عِلْمَ لَنَا إِلاَّ
ا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ (32) قَالَ يَا آدَمُ أَنبِئْهُم
مَّا أَنبَأَهُم بِأَسْمَائِهِمْ قَالَ أَلَمْ أَقُل لَّكُمْ إِنِّي أَعْلَمُ غَيْبَ
تِ وَالأَرْضِ وَأَعْلَمُ مَا تُبْدُونَ وَمَا كُنتُمْ
تَكْتُمُونَ .} (33) سورة البقرة

صدق الله العظيم

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

(قل إعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

صدق الله العظيم

إلهي لايطيب الليل إلا بشكرك ولايطيب النهار إلا بطاعتك .. ولاتطيب اللحظات إلا بذكرك .. ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك .. ولا تطيب الجنة إلا برؤيتك الله جل جلاله

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين ..سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

يا من أحمل اسمك بكل فخر

يا من أفتقدك منذ الصغر

يا من يرتعش قلبي لذكرك

يا من أودعتني لله أهديك هذا البحث .....أبي الغالي

اللهم انزل على قبره الضياء والنور والسرور

وجازه بالإحسان أحسانا وبالسيئات مغفرة ورضوانا

اللهم خذه من ضيق اللحود إلى الجنات الخلود وارحمه واغفر له يارب العالمين

انا لله وانا اليه راجعون

إلى حكمتي .....وعلمي

إلى أدبي .....وحلمي

إلى طريقي .... المستقيم

إلى طريق..... الهداية

إلى ينبوع الصبر والتفاؤل والأمل
إلى كل من في الوجود بعد الله ورسوله
.....أمي الغالية
إلى سندي وقوتي وملاذي بعد الله
إلى من آثروني على نفسهم
إلى من علموني علم الحياة
إلى من أظهروا لي ما هو أجمل من الحياة
.....إخوتي وأخواتي الكرام
إلى من كانوا ملاذي وملجئي
إلى من تذوقت معهم أجمل اللحظات
إلى من سأفتقدهم ..... وأتمنى أن يفتقدوني
إلى من جعلهم الله سندا لي في دراستي ومن أحببتهم في الله ..... أخوتي في الله
إلى من يجمع بين سعادتي وحزني
إلى من لم أعرفهم ..... ولم يعرفوني
إلى من أتمنى أن أذكرهم .....إذا ذكروني
إلى من أتمنى أن تبقى صورهم .....في عيوني

شكر وعرفان

قال تعالى {وَقَالَ رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَى وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ }النمل19.

الشكر والمنة والحمد لله أولاً على ما هدى ووفق وسدد. فإني مدين بالشكر لكل من قدم إلي يد العون خلال مسيرة تعليمي من أساتذة وأقارب وأصدقاء، وكذلك الشكر لكل من ارشدني في كتابة هذا البحث المتواضع فلهم مني الشكر والتقديربعد شكر الله عز وجل.

الشكر والتقدير لأساتذي الجليل المشرف د/ أحمد حسن الفكي الذي أشرف على هذا البحث منذ أن كان فكرة ، وكزلك الشكر إلى د/ بشير الحاج وكذلك الشكر إلى الأساتذة الكرام بجامعة أم درمان الإسلامية بكلية العلوم والتقانة قسم الفيزياء ، والشكر أيضا يمتد إلى أصدقاء الدراسة محمد منّ السيد و محمد بلة ، كما يمتد الشكر أيضا إلى الأساتذة بجامعة السودان كلية العلوم قسم الفيزياء فلهم منا الشكر والمنة بعد الله تعالى.

المستخلص

في هذا البحث تمت دراسة حالة مفاعلات الماء الخفيف حيث تم التعرف على كيفية إنتاج الطاقة النووية عن طريق المفاعلات النووية بواسطة إنشطار اليورانيوم ، كما تم التعرف على المفاعلات النووية من حيث المكونات وطريقة

عملها والدول النووية المعاصرة وكذلك الطاقة النووية في الوقت الحاضر والمخاطر التي تكمن في المفاعلات من حيث إنبعاث الاشعاعات النووية وكيفية التخلص منها ، كما تم التعرف على بعض أنواع المفاعلات النووية بشكل عام من خلال تقسيم المفاعلات النووية وكذلك تصنيفها ، ومن ثم تم التعرف على مفاعلات الماء الخفيف التي هي موضوع دراستنا حيث تم التعرف على نوعين من مفاعلات الماء الخفيف وهما مفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء المغلي حيث تم التعرف على المكونات لهذين المفاعلين وكذلك طريقة عمل كل منهما وكذلك المميزات و العيوب لكل من المفاعلين ، ومن خلال هذه الدراسة نستنتج أن مفاعلات الماء الخفيف يمكن أن توفر لنا طاقة سلمية كافية ورخيصة الثمن وذات جودة عالية وغير مكلفة في حد ذاتها من حيث البناء و أن بامكاننا إنشاء مفاعلا من مفاعلات الماء الخفيف .

Abstract

In this research has the case of light-water reactors study were to identify how nuclear energy production by nuclear reactors by fission of uranium, as has been identified nuclear reactors in terms of ingredients and modus operandi of

contemporary nuclear states, as well as nuclear energy at the present time and the risk that the reactors in terms of emission of nuclear radiation and how to get rid of them, as has been identified some types of nuclear reactors in general by the division of nuclear reactors, as well as classified, and then identified the light water, which is the subject of our study reactors which have been identified two types of light-water reactors and two reactors pressurized water reactors and boiling water which has been identified as components of these reactors as well as the way of each other's work, as well as the advantages and disadvantages of each of the reactors, and through this study we conclude that the light-water reactors can provide us with adequate and cheap for peaceful energy price and high quality and inexpensive in the end the same in terms of construction and that we can create a reactor of the light-water reactors.

الفهرس

الرمز	الموضوع	الصفحة
-	الاستهلال	أ
-	الإهــداء	ب
-	شكر وعرفان	ج

-	ملخص الدراسة بالعربية	ح
-	ملخص الدراسة بالانجليزية (Abstract)	خ
-	فهرس الموضوعات	د
-	فهرس الجداول	ر
-	فهرس الأشكال	ر
-	الفصل الأول المقدمة	1
(1.1)	تاريخ المفاعلات	1
(2.1)	أهداف البحث	2
(3.1)	دراسات سابقة	2
(4.1)	مشكلة البحث	2
(5.1)	أهمية البحث	2
(6.1)	محتوى البحث	2
-	الفصل الثاني المفاعلات النووية	3
(1.2)	كيف يتم إنتاج الطاقة النووية	3
(2.2)	اليورانيوم	3
(3.2)	تخصيب اليورانيوم	4
(4.2)	التفاعلات المتسلسلة	4
(5.2)	مكونات المفاعل النووي	5
(6.2)	طريقة عمل المفاعل النووي	9
(7.2)	المفاعلات النووية في الدول المعاصرة	9
(8.2)	المفاعلات والبيئة	2
(9.2)	الطاقة النووية في الوقت الحاضر	14
(10.2)	هموم الأمان	17
-	الفصل الثالث بعض أنواع المفاعلات النووية	19
(1.3)	تصنيف المفاعلات النووية حسب طبيعة التفاعل النووي	20
(2.3)	المفاعلات النووية الإنشطارية	22
(1)	التصنيف حسب طاقة النيوترون أو فعاليتها	22
(2)	التصنيف حسب التركيب (الشكل العام) لقلب المفاعل	22
(3)	التصنيف حسب إمكانية إنتاج مواد جديدة قابلة للإنشطار	22
(4)	تصنيف المفاعلات حسب التطبيقات	23

(3.3)	مفاعلات الاندماج النووي	24
-	مقدمة	24
-	مميزات مفاعل الاندماج النووي	24
-	صعوبات صناعة مفاعل الاندماج النووي	24
-	الفصل الرابع	27
(1.4)	خصائص الماء الخفيف	27
(2.4)	مميزات مفاعلات الماء الخفيف	27
(3.4)	مفاعلات الماء المضغوط	27
(1.3.4)	أجزاء مفاعل الماء المضغوط	29
(2.3.4)	طريقة عمل مفاعلات الماء المضغوط	30
(3.3.4)	الوقود	30
(4.3.4)	المهدئ	30
(5.3.4)	المبرد	31
(6.3.4)	القوة الناتجة	31
(7.3.4)	الطاقة النوعية الناتجة	31
(8.3.4)	فعالية المفاعل	31
(9.3.4)	مميزات مفاعلات الماء المضغوط	31
(10.3.4)	عيوب مفاعلات الماء المضغوط	31
(4.4)	مفاعل الماء المغلي	31
(1.4.4)	أجزاء مفاعل الماء المغلي	33
(2.4.4)	طريقة عمل مفاعلات الماء المغلي	35
(3.4.4)	الوقود	35
(4.4.4)	المهدئ	35
(5.4.4)	المبرد	36
(6.4.4)	الأمان(السلامة)	36
(7.4.4)	أنواع مفاعلات الماء المغلي	37
(8.4.4)	مميزات مفاعل الماء المغلي	38
(9.4.4)	عيوب مفاعلات الماء المغلي	38
(5.4)	الخاتمة	39

(6.4)	التوصيات	39
	المراجع	40

فهرس الجداول

رقم الجدول	الموضوع	الصفحة
الجدول (2-1)	يتضمن عدد المفاعلات النووية وإنتاجها من الطاقة مصنفة حسب البلد	47
الجدول (3-1)	يوضح بعض أنواع المفاعلات وخصائصها	50

فهرس الأشكال

رقم الشكل	الموضوع	الصفحة
شكل (2-1)	أجزاء المفاعل النووي	53
شكل (3-1)	مفاعل انشطار	54
شكل(3-2)	مفاعل الاندماج النووي	55
شكل(4-1)	يوضح مفاعل نووي يعمل بالماء المضغوط	56
شكل (4-2)	مخطط يوضح قوى نووية تعمل بالماء المضغوط (كمبرد)	57
شكل (4-3)	مفاعل الماء المغلي	58
شكل (4-4)	أجزاء مفاعل الماء المغلي	59

الفصل الأول

المقدمة

(1.1) تاريخ وتطوير المفاعلات:

منذ أن أنشئ أول مفاعل نووي فان تطورا سريعا قد حدث في هذا المجال حيث بلغ عدد أنواع المفاعلات خلال السنوات القليلة عدة مئات منذ صناعة المفاعلات .

وتوجد الآن مفاعلات نووية كثيرة تعمل في جميع أنحاء العالم ، وقد تعددت انواعها بشكل كبير ، وذلك لتعدد الأغراض ذاتها التي تبنى من اجلها المفاعلات .

يعتمد تصمميم المفاعل أولا وقبل كل شئ على الغرض المطلوب أو الهدف من بناء المفاعل فهنالك مثلا مفاعلات انتاج الطاقة وتحويلها الى طاقة كهربائية ، وهو الغرض الاسمى من تشييد المفاعل النووي ، ويراعى في تصميمها أن تعطي طاقة رخيصة مع الأخذ بالإعتبار المدة الطويلة التي يكون خلالها المفاعل صالحا للعمل ،وهذا ما تسعى اليه معظم الدول النووية العظمى .

والجدير بالذكر أن المفاعلات النووية او محطات القوى النووية تستند إلى أساسيات ثلاثة في التصميم وهي:

- مادة احداث الانشطار و طاقتها كما في المفاعلات التي تستخدم النيوترونات الحرارية والسريعة.
- شكل قلب المفاعل (متجانس الوقود او غير متجانس، و أدوات التبريد وأنظمته ووسائل التهدئة).
- الأستفادة من الوقود المستعمل.

وكذلك الجدير بالذكر أن المفاعلات النووية يتم تصنيفها إلى :

- التصنيف حسب نوع المادة المبردة للمفاعل ومنها مفاعلات الماء الخفيف ، مفاعلات الماء الثقيل ، و المفاعلات الغاذية .

وفي هذا البحث نتناول مفاعلات الماء الخفيف للدراسة من حيث المكونات والمميزات والعيوب بالتفصيل.

- وكذلك التصنيف حسب الاستخدام .
- التصنيف حسب طاقة النيوترونات المحدثة للانشطار [1].

(2.1) أهداف البحث :

يمكن تلخيص اهداف البحث في الآتي:

- إنتاج الطاقة وتحويلها الى طاقة كهربائية .
- إنتاج طاقة رخيصة الثمن.
- إنتاج الطاقة بكفاءة عالية نسبيا.

(3.1) الدراسات السابقة:

إستخدام المفاعلات النووية لإنتاج الطاقة الكهربائية ، رحاب فضل الله محمد (جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا،2013) .

(4.1) مشكلة البحث:

تكمن مشكلة البحث في إنتاج طاقة بديلة تكون رخيصة الثمن و متوفرة بكميات كبيرة وتكون ذات كفاءة عالية نسبيا.

(5.1) أهمية البحث:

يمكن الوقوف على أهمية البحث في الآتي:

- يوضح هذا البحث كيفية استخدام المفاعلات النووية في إنتاج الطاقة السلمية المستخدمة في العديد من المجالات.
- الوقوف على المفاعلات بصورة عامة وعلى مفاعلات الماء الخفيف بصورة خاصة.

(6-1) محتوى البحث:

يحتوي البحث على الفصول التالية:

- الفصل الاول المقدمة
- الفصل الثاني المفاعلات النووية
- الفصل الثالث بعض أنواع المفاعلات النووية
- الفصل الرابع مفاعلات الماءالخفيف والخاتمة والتوصيات والمراجع

الفصل الثاني

المفاعلات النووية

مقدمة:

المفاعلات النووية عبارة عن منشآت تستخدم لإغراض الحصول على الطاق الكهربائية أو تحويل عناصر كيميائية معينة إلى عناصر أخرى ذات أنشطة إشعاعية تستخدم للتطبيقات الطبية أو الصناعية أو للبحوث النووية .

(1.2) كيف يتم إنتاج الطاقة النووية :

تنتج كل محطات القدرة النووية التجارية الكبيرة طاقتها بإنشطار اليورانيوم 235 الذي يؤلف أقل من 1% من اليورانيوم الموجود في الطبيعة؛ بينما يؤلف اليورانيوم 238 حوالي 99 % من هذا اليورانيوم. ويوجد هذان النوعان معا في خام اليورانيوم مثل الكرنوتيت والبتشبلند. ويَصْعُب إلى حد كبير فصل اليورانيوم 235 عن اليورانيوم 238 في خامات اليورانيوم، ويكلفكثيرً ا. لذلك يتكون معظم الوقود المستعمل في المفاعلات من اليورانيوم 238، ولكنه يتضمن ما يكفي من اليورانيوم 235 لإحداث التفاعل المتسلسل. ويتطلب الوقود النووي إجراءات خاصة قبل وبعد استعماله. وتبدأ هذه الإجراءات باستخراج خام اليورانيوم وتنتهي بالتخلص من النفايات. وتعرف هذه الإجراءات كاملة باسم دورة الوقود النووي [2].

(2.2) اليورانيوم :-

من المعروف أن اليورانيوم يوجد في الطبيعة داخل الأرض وعدده الذري (92) ويوجد طبيعيا بثلاثة نظائر هي :-

1- اليورانيوم (234) بنسبة 0.0054% ويضمحل بعمر نصف مقداره (704) مليون سنة .

2- إما اليورانيوم (238) يوجد بنسبة (99.275%) ويضمحل بعمر نصف (4468)

مليون سنة و كثافته تساوي 19.05 جم.سم$^{-3}$ وينصهر عند 1123 درجة مئوية ويغلي عند 3818 درجة مئوية وللمقارنة نذكر أن كثافة الحديد تساوي 7.89 جم . سم$^{-3}$.

3- اليرانيوم (235) ويتصف بانشطار نواتجه عند قصفها بنيوترونات بطيئة ، ويصاحب ذلك إنبعاث طاقة كبيرة ، و يكون الإنشطار متسلسلا (إما أن يسيطر عليه كما في المفاعلات النووية لتوليد الطاقة أو يكون غير مسيطر عليه أي أنفجارية كما في القنبلة النووية الإنشطارية) [3].

(3.2) تخصيب اليورانيوم:-

نظير اليورانيوم – 235 القابلة للإنشطار ليشكل نسبة (0.7%) من اليورانيوم الموجود في الطبيعة والباقي اليورانيوم – 238 ونظائر أخرى .

حيث تهدف عملية التخصيب إلى إنتاج غاز يحتوي على نسبة عالية من اليورانيوم – 235 وهي عملية تتم على عدة خطوات يتم فيها عزل كميات أكبر من النظير غير المرغوب فيه حتى تصل إلى نسبة عالية في النقاء المطلوب وهذا الموضوع قد يستمر إلى عدة أعوام [3] .

(4.2)التفاعلات المتسلسلة :

التفاعل المتسلسل هو سلسلة تفاعلات انشطار مستديمة ذاتيًا ومستمرة تتم في كتلة من اليورانيوم أو البلوتونيوم ، يحتاج المفاعل إلى كمية من الوقود مناسبةتمامًا للحفاظ على التفاعل المتسلسل، وتسمى هذه الكمية الكتلة الحرجة. وهي تختلف باختلاف حجم المفاعل وتصميمه. ويتوقف التفاعل المتسلسل إذا نقصت كمية الوقود في المفاعل عن الكتلة الحرجة. أما إذا تجاوز تزويد المفاعل بالوقود هذه الكتلة الحرجة فإن درجة حرارته ترتفع ارتفاعًا مفرطًا، ومنثَمّ يمكن أن ينصهر القلب. ولكن المفاعلات تصمم بحيث يجعلها تحتفظ بكمية من الوقود أكثر من الكتلة الحرجة. وتستطيع قضبان الأمان أن تبطئ التفاعل المتسلسل إذا ازدادت سرعته ازديادًاكبيرًا .وتتم تهيئة المفاعل للعمل بتزويد قلبه بمجمعات الوقود وإدخال قضبان التحكم إدخالاً كاملاً . وفي مفاعل الماء الخفيف يملأ الماء المستخدم كمهدئًا لتخفيض سرعة النيوترونات، الفجوات بين مجمعات الوقود. وبعدئذ تُسحب قضبان التحكم ببطء ويبدأ التفاعل

المتسلسل. وكلما أبُعدت القضبان بسحبها ازدادت شدة التفاعل إذ لا يُمتص حينئذ إلا القليل من النيوترونات، ويصبح الكثير منهلدَّر ًا لإحداث الانشطار. وينقل الماء، الذي في قلب المفاعل، الحرارة الهائلة التييولِّدها التفاعل المتسلسل. ويمكن إيقاف هذا التفاعل بإنزال القضبان مرة أخرى إلى قلب المفاعل لامتصاص معظم النيوترونات الحرة [2].

(5.2) مكونات المفاعل النووي :

يتكون المفاعل النووي من الأجزاء التالية حسب الشكل (2-1):

1- الوقود النووي:

يتكون من أقراص من ثاني أوكسيد اليورانيوم Uo_2 يتم تلبيدها لإعطائها الكثافة المطلوبة ترتب في أنابيب لتكون أعمدة الوقود ، تعبأ الأعمدة في منظومة تسمى منظومة الوقود و توضع في قلب المفاعل (و هو الجزء الذي تتم فيه عمليات الإنشطار) .

2- أعمدة السيطرة :

هى المكونات التي تقوم بإمتصاص النيوترونات المتولدة من الإنشطار بإدخلها و إخراجها من قلب المفاعل للتحكم بمعدل التفاعل أو إيقاف المفاعل (توجد منظومة ثانوية لإغراض المفاعل تتضمن إضافة مواد أخرى لإمتصاص النيوترونات عادة ما تكون بشكل مائع) وتتكون من مواد مثل الكادميوم ، الهافنيوم، أو البورون.

3- المبرد :

سائل أو غاز يدور حول قلب المفاعل لنقل الحرارة أو إمتصاصها من الوقود ، لمنع ذوبان قضبان الوقود وقد يستعمل الماء أو الماء الثقيل.

يقسم المبرد المستخدم في المفاعلات إلى الأنواع التالية :

أ- الماء أو الماء الثقيل والذي يكون تحت ضغط عالي (Mpa (15-7)) ليستطيع العمل وفق 100درجة مئوية كما في المفاعلات المستخدمة الآن وقيم الضغط لها تأثير على هندسة المفاعلات فعندما يصل الضغط إلى 25MPaيمكن أن تكون كفاءة المفاعل الحرارية 45%[1].

. وتوجد بعض محطات القدرة النووية في هذه السنوات تصل الحرارة فيها إلى 600درجة مئوية وعند ضغط عالي جدا 30 Mpa وكفاءة المفاعل الحرارية قد تصل إلى 50%.

ب-الهليوم يستخدم كمبرد عند نفس الضغط العالي (7-15Mpa) ليولد كثافة حرارية مناسبة، ويمكن أن يستخدم لإيصال البخار مباشرة لتحريك التوربين ثم المولد الكهربائي.

ت- ثاني أوكسيد الكربون أستخدم في المفاعلات البريطانية الأولى وبسبب الكثافة العالية (أعلى من كثافة الهليوم) فإن الكثافة الحرارية لهذه المفاعلات تكون عالية.

ث- الصوديوم يستخدم كالمعتاد في مفاعلات النيوترونات السريعة، يذوب في 98 درجة مئوية و يغلي في 883 درجة مئوية عند الضغط الجوي ، و بالرغم من الحاجة لأن يكون المبرد جافا لكن يفضل أن يكون معتدلا ، يستخدم الماء و البخار في الدوائر الثانويه لدفع البخار إلى التوربين.

ح- الرصاص - البزموث هذه المبردات تعمل تحت درجات عالية جدا ، و تكون شفافة للنيوترونات ولا تتفاعل مع الماء لكنها تسبب تأكل غلاف الوقود و الحديد .

المبرد في الخليط pb – Bi يولد البلونيوم نتيجة للتنشيط النيوتروني له .

عام 1998م أطلقت بحوث سابقة حول هذا المبرد من خلال الخبرة الروسية الكبيرة في إستخدامه في المفاعلات الغواصة، استعملت هذه المبردات في المفاعلات الصغيرة الأمريكية [1].

ج- أملاح الفلور المنصهرة يغلي هذا المبرد عند 1400درجة مئوية عند الضغط الجوي ، و بذلك توجد عدة خيارات لإستخدام الحرارة و التي تشمل إستعمال الهليوم في دورات التبريد الثانويه و بكفاءة 48%عند الحرارة 750درجة مئوية وتصل إلى 59%عند الحرارة 1000 درجة مئوية

4- أوعية الضغط:

تتكون من أوعية من الحديد تحوي القلب ، المهدئ و المبرد ، و قد تكون سلسة من الأنابيب تحمل الوقود و تنقل المبرد و المهدئ.

5- مولد البخار :

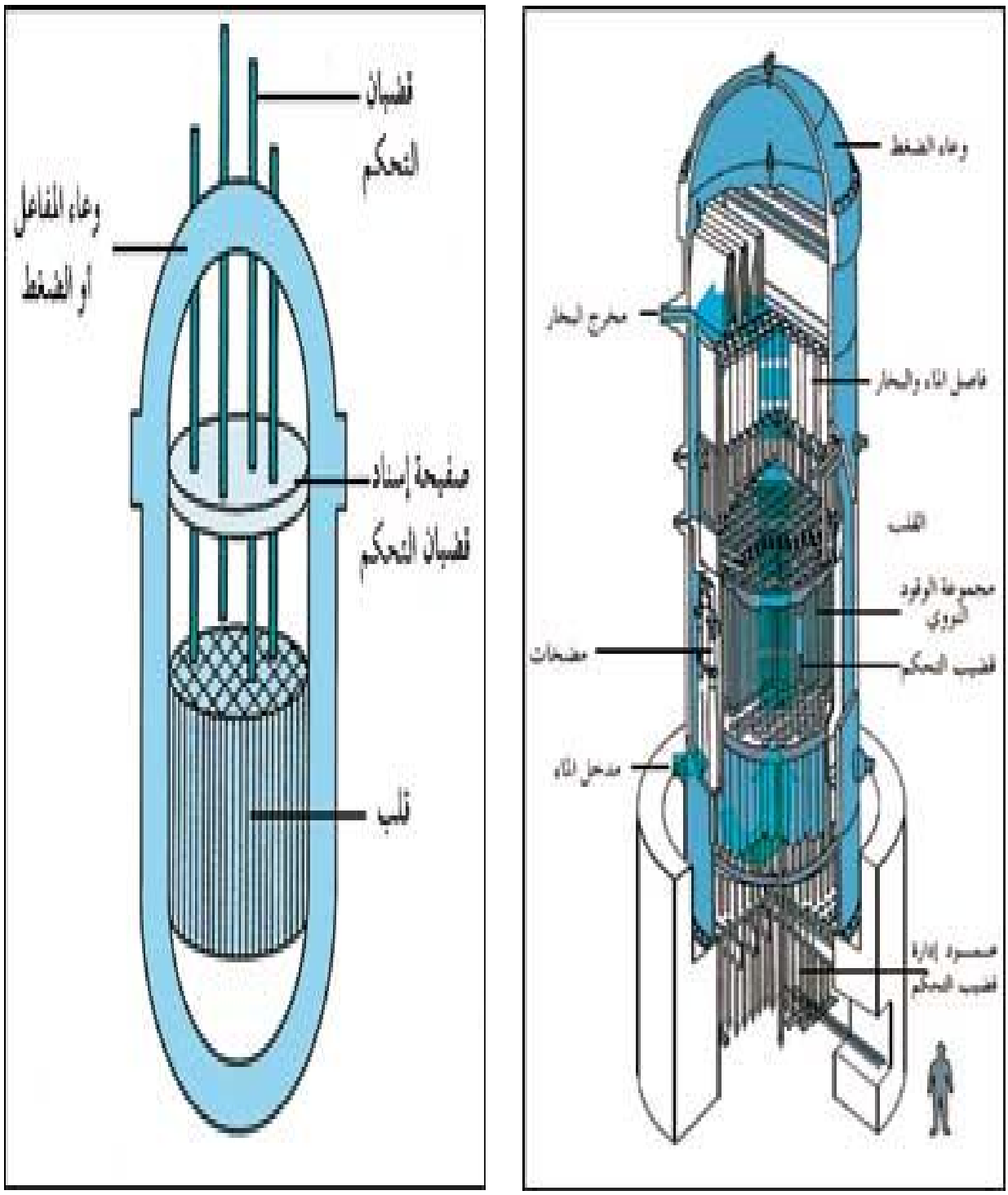
جزء من منظومة التبريد حيث تستثمر الحرارة المتولدة لتوليد البخار نتيجة لنقل الحرارة من موقع التفاعل إلى موقع توليد البخار لتدوير التوربين في مفاعلات القدرة.

6- المهدئ :

مواد مثل الجرافيت أو الماء الثقيل للتحكم في سرعة عمليات الإنشطار النووي نتيجة لتهدئة النيوترونات السريعة الناتجة من الإنشطار و تحويلها إلى نيوترونات حرارية يتم إمتصاصها من اليورانيوم 235 فينفجر بكفاءة عالية .

7- جسم المفاعل containment :

حاويات تحيط قلب المفاعل و المبرد لمنع تسرب الإشعاعات الناتجة من الإنشطار النووي و لحماية المفاعل من الاصطدام الخارجي يتكون من بناء سميك من الكونكريت و الحديد [1].



شكل (2-1) أجزاء المفاعل النووي

(6.2) طريقة عمل المفاعل النووي:

يتم وضع اليورانيوم المخصب على شكل كريات صغيرة داخل قضبان طويلة ويتم تجميع القضبان على شكل حزم، من ثم يتم إغراق هذه الحزم في ماء (الذي يعمل عمل مبرد) داخل وعاء ضغط (حجرة يمكن التحكم بضغطها الداخلي). في حال عدم التدخل، سترتفع درجة حرارة اليورانيوم و يذوب تلقائياً .

لمنع هذا الذوبان توضع قضبان تحكم (Control Rods) و التي تكون مصنوعة من مواد تمتص النيترونات بين حزم اليورانيوم. فعندما نحتاج طاقة حرارية أكبر من الحزم يتم رفع أو إبعاد قضبان التحكم عنها فتعود إلى ارتفاع الحرارة التلقائي. أما عندما نحتاج حرارة أقل يتم إعادة قضبان التحكم إلى الحزم فيعود ويمتص النيترونات وبالتالي تنتج الحزم طاقة أقل.

تمثل حزم اليورانيوم المصدر الأساسي للطاقة في المفاعلات التي تنتج طاقة حرارية تبخر المياه. يتحرك البخار، كما ذكرنا في المحطة التقليدية، فيدور محرك التوربين والذي يكون متصلاً بمولد لتوليد الكهرباء[5].

(7.2) المفاعلات النووية في الدول المعاصرة :

بعد الدراسة النظرية لمسألة المفاعلات النووية، لا بد لنا من اعطاء فكرة تاريخية عن البرامج النووية في الدول النووية. ثم مفاعلات الطاقة النووية على مختلف انواعها واستخداماتها في الدول التي لا تدخل في عضوية النادي النووي. مع العلم بان الخمس دول الواردة في الفئة الاولى هي الدول الاعضاء في النادي النووي [6] .

و يتضمن الجدول (2-1) عدد المفاعلات النووية وإنتاجها من الطاقة مصنفة حسب البلد.

الجدول (2-1) عدد المفاعلات النووية وإنتاجها من الطاقة مصنفة حسب البلد

البلد	عدد المفاعلات	إنتاج الطاقة	البناء	مخطّط له أو مطلوب	مقترحة
الاتحاد الأوروبي	147	130,267	2		7
أرمينيا	1	376			1
ألمانيا (details)	17	20,339			
أوكرانيا	15	13,107		13 (by 2030)	
إسبانيا (details)	8	7,446			
إسرائيل	0	0			1
إندونيسيا	0	0			4
إيران	0	0	1	2	3
الأرجنتين	2	935	1		
البرازيل	2	1,901		1	2
السويد (details)	10	8,910			
الصين (details)	10	7,572	5	5	19

البلد	عدد المفاعلات	إنتاج الطاقة	البناء	مخطّط له أو مطلوب	مقترحة
المجر	4	1,755			
المكسيك	2	1,310			2
المملكة المتحدة (details)	23	11,852			
الهند (الطاقة النووية في الهند)	16	3,557	7	4	20
الولايات المتحدة (details), (List)	104	99,209	1		24
اليابان (برنامج نووي ياباني)	55	47,593	1	1	
باكستان	2	425	1		2
بلجيكا	7	5,824			
بلغاريا (details)	4	2,722		2	
بولندا	0	0			1
تايوان (تايوان) (details)	6	4,884	2		
تركيا	0	0		3	
جمهورية التشيك (details)	6	3,368			2

البلد	عدد المفاعلات	إنتاج الطاقة	البناء	مخطّط له أو مطلوب	مقترحة
جنوب أفريقيا	2	1,842		1	24
روسيا (details)	31	21,743	7	9	19
رومانيا	2	1,355		2	
سلوفاكيا	6	2,442			2
سلوفينيا	1	656			
سويسرا (details)	5	3,220			
فرنسا (details)	59	63,363	1		1
فنلندا (details)	4	2,676	1	1	
فيتنام	0	0			2
كندا (details)	18	12,599		2	
كوريا الجنوبية (details)	20	16,810		8	

البلد	عدد المفاعلات	إنتاج الطاقة	البناء	مخطّط له أو مطلوب	مقترحة
كوريا الشمالية	0	0	4		
ليبيا (details)					
ليتوانيا	1	1,185			1
مصر	0	0			1
هولندا	1	449			
العالم	**439**	**370,721**	**28**	**62**	**162**

(8-2) المفاعلات والبيئة:

تنتج المفاعلات النووية القدرة الكهربائية دون حرق الوقود التقليدي مثل الفحم الحجري أو النفط. ولذا فإن المفاعلات النووية تساعد على حفظ الاحتياطي العالمي من الوقود غير المتجدد والقابل للنضوب، لاستخدامات أخرى أهم من حرقه. ولا تتصاعد من المفاعلات النووية في عملية توليد القدرة الكهربائية أية أدخنة أو غازات، ومن ثم فلا تُعَدُّ المفاعلات النوويةمصدرً ا لتلوث الهواء. وعلى الرغم من هذه المميزات فإن التفاعلات النووية تسبب بعض المشكلات الجديدة وغير المعروفة من جراء استخدام المفاعلات النووي.

وتولّد محطات القدرة النووية قدرًا كبيرًا من الطاقة الحرارية، أكثر مما تولده محطات القدرة، التي تحرق الفحم الحجري أو النفط. ولهذا السبب تحتاج المفاعلات النووية كميات كبيرة جدًا من الماء لتبريد أنظمتها، ومن ثم تَضُخ كميات ضخمة من المخلفات المائية الساخنة، وتلقي بها في البحيرات والمجاري المائية. ويطلق على الكمية الكبيرة من الماء الساخن المتدفق إلى البيئة المحيطة من المفاعلات النووية التلوث الحراري وهو ضار بالحيوانات و النباتات التي تنمو وتعيش في مدى منخفض من درجات الحرارة . وللمساعدة في حل مشكلة التلوث الحراري تستخدم أبراج تبريد الهواء لتبريد الماء الساخن الناتج عن المفاعلات النووية قبل ضخه إلى البحيرات والمجاري المائية .

وثمة مشكلة أخرى ترتبط باستخدام المفاعلات النووية، إلى جانب مشكلة التلوث الحراري، وهي كيفية التخلص من نواتج الانشطار والمخلفات المشعة الأخرى الناتجة في المفاعل. وتظل هذه المخلفات ذات النشاط الإشعاعي لآلاف السنين، ولهذا يمكن أن تسببأضرارًا إشعاعية خطيرة لجميع الكائنات الحية على وجه الأرض. ولم يتوصل العلماء حتى الآن إلى طريقة مناسبة للتخلص من هذه المخلفات بشكل نهائي. وفي فترة الستينيات والسبعينيات من القرن العشرين، تم تخزين معظم المخلفات المشعة الناتجة عن المفاعلات في حاوياتمدرّعة دفنت في باطن الأرض.

ويُقِضّ مضجع كثير من الناس احتمال وقوع حادثة خطيرة في واحد من المفاعلات. وقد تزايد هذا الخوف بعد حادث مفاعل القدرة النووية في الاتحاد السوفييتي السابق عام 1986م، حيث انفجر المفاعل النووي في تشيرنوبل بالقرب من مدينة كييف بأوكرانيا، واشتعلت الحرائق فيه. وأدى هذا الحادث إلى انطلاق كميات ضخمة من المواد المشعة، التي انتشرت في المناطق المحيطة وعلى مساحات واسعة، مما عرَّض حياة آلاف الناس لمستويات خطرة من الإشعاعات. وقد سبب إنشاء عدد قليل من المفاعلات النووية الجديدة ـ في أماكن مختلفة من العالم كثيرًا من الذعر والخوف ومردُّ ذلك إلى عدم توافر سلامة أي من هذه المفاعلات [7].

(9.2) الطاقة النووية في الوقت الحاضر:

تشمل انتشار الكفاءة النووية، والبحث عن أنواع جديدة من المفاعلات، وأجهزة الاندماج التجريبية، وهموم الأمان:

- انتشار الكفاءة النووية :

شيدت عدد من الدول أثناء الستينيات وأوئل السبعينيات مفاعلات استُعملت لبدء تطوير القدرة النووية. وحدث أيضًا أثناء هذه الفترةتقدُّمُ في تحديد تجارب الأسلحة النووية، والحد من انتشارها. ففي عام 1970م، على سبيل المثال، أصبحت معاهدة الحد من انتشار الأسلحة النووية سارية المفعول. وتحظر المعاهدة على الولايات المتحدة والاتحاد السوفييتي (سابقًا) والقوى النووية الأخرى التي وقعت على وثيقة المعاهدة وصادقت عليها، أن تبيع أسلحة نووية للدول التي لم تكن تمتلك منها شيئًا. وتحظر هذه المعاهدة أيضًا على الدول التي ليس لديها أسلحة نووية أن تسعى للحصول عليها.

غير أن معاهدة الحد من انتشار الأسلحة النووية لا تحظر على الدول بيع المفاعلات النووية أو شراءها. ولكن المفاعل لا يستعمل لأغراض سلمية فحسب، بل يمكن استعماله لإنتاج البلوتونيوم اللازم للحصول على الأسلحة النووية. فالهند استعملت مفاعل بحوث لهذا الغرض، واستطاعت أن تفجر عام 1974م أول قنبلة ذرية لها. وكانت كندا قدزوّدت الهند بالمفاعل لاستعماله لأغراض سلمية فحسب. وإذا كانت كندا قد وقعّت على معاهدة الحد من انتشار الأسلحة النووية، فإن الهند لم تكن قدوقّعت عليها. ويتساءل منتقدو ما فعلته الهند عن الحكمة في تزويد دول بمفاعلات لم تكن تمتلك شيئًا منها في السابق.

وكانت الولايات المتحدة أثناء ذلك قد زادت قدرة طاقتها النووية زيادة كبيرة، ولكن معارضة تطوير الطاقة النووية ازدادت أيضا في الولايات المتحدة وبلاد أخرى أثناء أواخر الستينيات وأوائل السبعينيات من القرن العشرين. وبدأ النقاد يتساءلون عن كل جانب من جوانب إنتاج الطاقة النووية، مثل كلفة إخصاب اليورانيوم ومشكلات التخلص من النفايات.

ويتهم كثير من نقاد البرامج النووية الحكومات بالتغاضي عن مختلف أخطار السلامة في المحطات النووية لتعزيز تطور الطاقة النووية.

- البحث عن أنواع جديدة من المفاعلات :

البحث عن أنواع جديدة من المفاعلات نشط خوفًا من نقص اليورانيوم 235 وعجزه عن دعم مفاعلات الانشطار. ولكن ازدياد إنتاج الطاقة النووية أثناء السبعينيات كان أبطأ مما كان متوقعًا، غير أنه لم يحدث ما كان متوقعًا من نقص. ويسعى العلماء في الوقت الحاضر إلى تطوير مفاعلات أكثر سلامة وأعلى مردودًا. ويركز الباحثون جهودهم على تطوير مفاعل اندماج ومفاعل مولِّد تجاري.

- أجهزة الاندماج التجريبية :

تركزت معظم الجهود التجريبية لإنتاج الطاقة من الاندماج النووي على استعمال بلازما فائقة الحرارة من الهيدروجين الثقيل كوقود. ويمكن أن يزودنا الهيدروجين الثقيل بمقادير لا حد لها من الطاقة تقريبًا، لأنه يمكن الحصول عليه من الماء العادي. وحاول بعض العلماء أن ينجزوا الاندماج النووي للهيدروجين الثقيل في درجات حرارة الغرفة. ولا شك أن كلفة استعمال وقود بارد في تفاعلات الاندماج أقل كثيرًا من تسخين بلازما إلى درجات حرارة فائقة. ولكن لا يعتقد معظم الخبراء أن أي نوع من أجهزة الاندماج العملية يمكن أن تُستكمل في القرن العشرين.

وقد صمم أكثر مفاعلات الاندماج نجاحًا أصلاً في الاتحاد السوفييتي (سابقًا) ويسمى توكاماك وتعني في الروسية التيار القوي. ويستعمل التوكاماك كغيره من مفاعلات الاندماج حقلاً مغنطيسيًا يدفع البلازما بعيدًا عن جدران الحاوية. كما يُرسلُ عبر البلازما تيارًا كهربائيًا شديدًا يعمل مع الحقل المغنطيسي لحصر البلازما في الحاوية.

وطوّر العلماء في الولايات المتحدة وفي غيرها من الدول توكاماكات أيضًا، ولكن لم ينتج أيٌّ منها حتى الآن مقادير مفيدة من الطاقة، إذ يجب تسخين البلازما حتى درجة حرارة تبلغ مائة مليون درجة مئوية على الأقل كي تحدث تفاعلاً نوويًا حراريًا متحكمًا فيه، ومن الصعب حصر البلازما في درجات حرارة كهذه.

وتُستعمل طريقة تجريبية أخرى لإنجاز الاندماج، باستخدام حزمة من أشعة الليزر لضغط حبيبات دقيقة من الديوتريوم والتريتيوم المجمّديْن وتسخينهما.وتولِّد هذه العملية انفجارات نووية حرارية مصغرة تطلق طاقة قبل أن تصل إلى جدران الحاوية، غير أن كل تجارب هذه الطريقة لم تؤد إلى إنتاج مقادير مفيدة من الطاقة.

المفاعلات المولِّدة التجريبية: يستعمل أهم نوع من المفاعلات المولِّدة التجريبية مقداراً وافراً من اليورانيوم 238 وقودًا أساسيًا،ويحوِّل المفاعل اليورانيوم 238 إلى البلوتونيوم 239 بالتفكك الإشعاعي.

ويستطيع البلوتونيوم 239، شأنه شأن اليورانيوم 235، أن يحدث تفاعلاً متسلسلاً وبذلك يمكن استخدامه في إنتاج الطاقة. ويستعمل مولِّد آخر عنصر الثوريوم الطبيعي وقودًا أساسيًا، ويحوله إلى اليورانيوم 233 الذي يمكنه أيضًا أن يحدث تفاعلاً متسلسلاً .

وقد أقامت كل من فرنسا وبريطانيا والهند واليابان والاتحاد السوفييتي (سابقًا) والولايات المتحدة مفاعلات مولِّدة تجريبية. وأنجح هذه المفاعلات هو المفاعل الفرنسي الذي يُسمى فينكْس، حيث يولّد بانتظام 250 ألف كيلوواط من الكهرباء. ولكن ليس لدى أي بلد حتى الأن مفاعل مولِّد صالح للاستعمال التجاري على نطاق واسع.

(10.2) هموم الأمان :

جرى عدد من الحوادث في محطات الطاقة النووية، ولم يكن معظمها خطيراً. ولكن ازداد القلق حول إجراءات الأمان الخاصة بإنتاج القدرة النووية بعد الحادث الخطير عام 1979م بمحطة القدرة النووية المقامة في جزيرة ثري مايل آيلانْد بالقرب من هاريسبرج في ولاية بنسلفانيا في الولايات المتحدة، إذ أدت أعطال آلية وبشرية إلى تعطيل نظام تبريد المفاعل وتدمير قلبه. وقد نجح العلماء والفنيون في منع انصهار القلب انصهاراً كليًا، الذي كان يمكن أن يؤدي إلى انطلاق مقادير كبيرة من النظائر المشعة إلى الجو المحيط بالمحطة. وقد استمر تنظيف المحطة حتى أواخر الثمانينيات.واستمر البحث في تطوير مفاعلات أكثر أمانا. فالمهندسون ـ على سبيل المثال ـ يعملون على إنشاء مفاعل يستعمل الجرافيت مهدِّئًا وإحاطة

قضبان الوقود بطبقات من الخزف والكربون بدلاً من الفلز، وهم يعتقدون أن مفاعلاً كهذا لا يمكن أن ينصهر قط. قضت التطورات السياسية في أوروبا الشرقية والاتحاد السوفييتي السابق بين عامي 1989م و1991م على الحرب الباردة. وتحول خوف أوروبا من الهجوم الشامل المتوقع إلى إرساء الاستقرار السياسي ومن ثم العسكري في المنطقة. ويتوقع المحللون العسكريون أن الاتفاق على خفض الترسانات النووية سيقلل من احتمال تطور التوترات السياسية إلى حرب شاملة [8].

فصل الثالث

بعض انواع المفاعلات النووية

مقدمة:

ان المفاعلات النووية أو محطات القوى النووية تستند الي اساسيات ثلاثة في التصميم وهي :

- مادة الإنشطار وطاقتها كما في المفاعلات التي تستخدم النيوترونات الحرارية و السريعة .
- شكل قلب المفاعل (متجانس الوقود او غير متجانس ، و أدوات التبريد و أنظمته ووسائل التهدئة).
- الإستفادة من الوقود المستعمل.

ويذكر أنه في حالة المفاعلات التي يعتمد تصميمها على الوقود المتجانس في القلب فإن الوقود يكون عبارة عن معدن أو أملاح منصهرة أو محلول عضوي ذو قدرة على الإنشطار أما في المفاعلات ذات الوقود غير المتجانس فإن الوقود عادة عبارة عن قطبان محشوة بواسطة أكاسيد المعادن مثل أكسيد اليورانيوم.

ويتم اليوم تصنيف أنواع المفاعلات وفق نوع المهدئ المستعمل في هذه المفاعلات ، فإذا رتبت كتل اليورانيوم المرشحة للإنشطار في طبقات يفصل بين كل أثنين منها مهدئ فإن المفاعل يسمى في هذه الحالة بالمفاعل غير المتجانس.

أما أذا وضعنا اليورانيوم في المهدئ أو كان مذابا فيه فإن المفاعل يوصف بأنه متجانس ، كما يمكن أيضا تصنيف المفاعلات وفق سرعة النيوترونات في المرجل (غلاية المفاعل) ويمكن الحديث هنا عن مفاعلات سريعة أو متوسطة السرعة أو بطيئة .

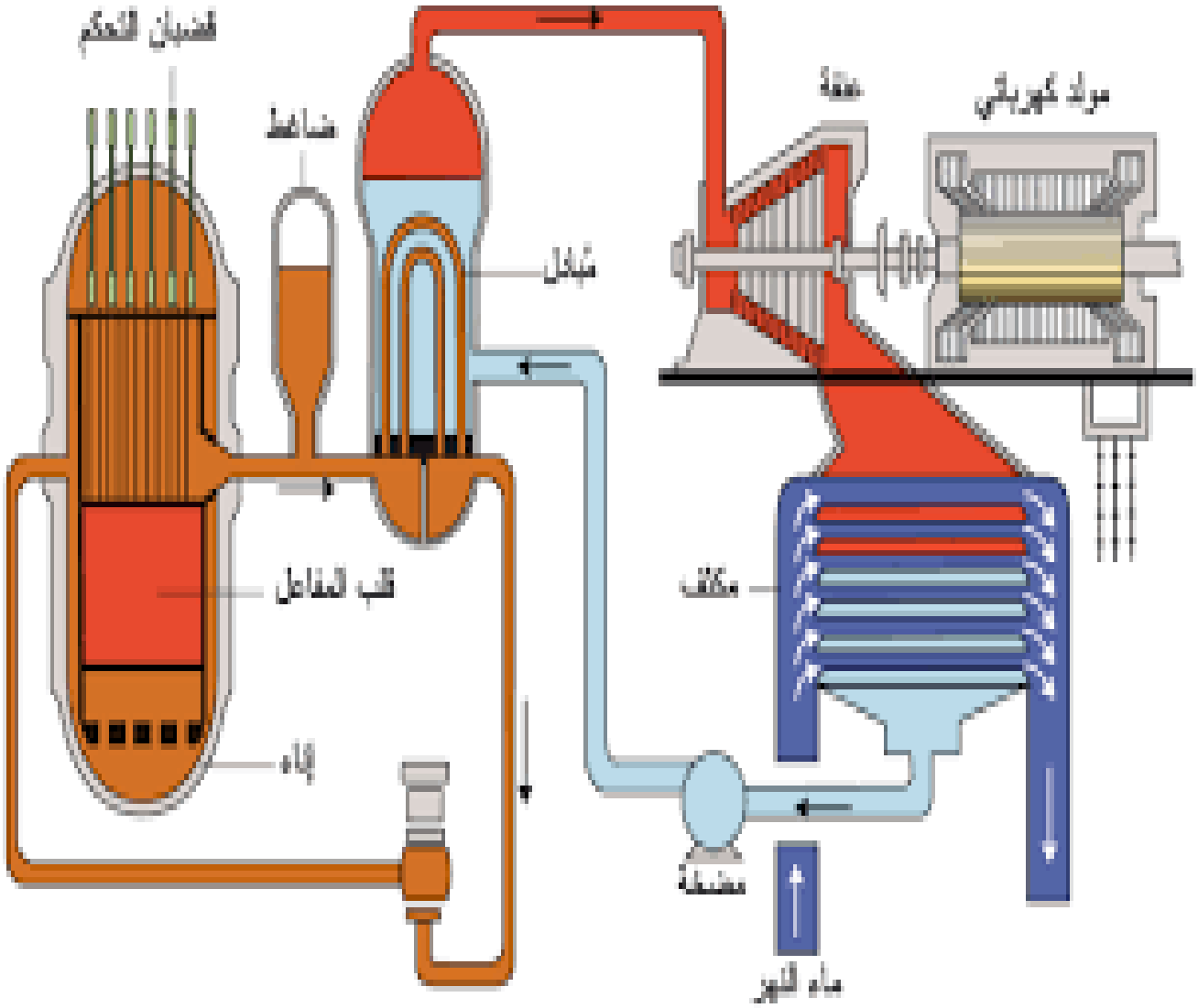
هنالك وسئلة ثالثة لتصنيف المفاعلات حيث تعتمد على الغاية التي يستعمل من أجلها المفاعل، ونعني في هذه الحالة :- مفاعلات الأبحاث ، مفاعلات إنتاج البلوتونيوم ، أو مفاعلات الحصول على الحرارة _ الكهرباء.....الخ ، وبالتالي قد نجد العديد من التصنيف لأنواع المفاعلات اليوم .

(1.3) تصنيف المفاعلات النووية حسب طبيعة التفاعل النووي :-

يمكن تصنيف المفاعلات النووية حسب طبيعة التفاعل النووي إلى نوعين :-

أ/ مفاعلات الانشطار النووي :

وهي تعتمد على إنشطار نوي اليورانيوم 235 أو ما نسميه الوقود الطبيعي ، وهنالك مفاعلات تستخدم الوقود الصناعي ، وهو البلوتونيوم – 239 أو اليورانيوم 233 و قد تم بالفعل تجريب هذه المفاعلات في الدول الصناعية الكبرى شكل (3-1) .

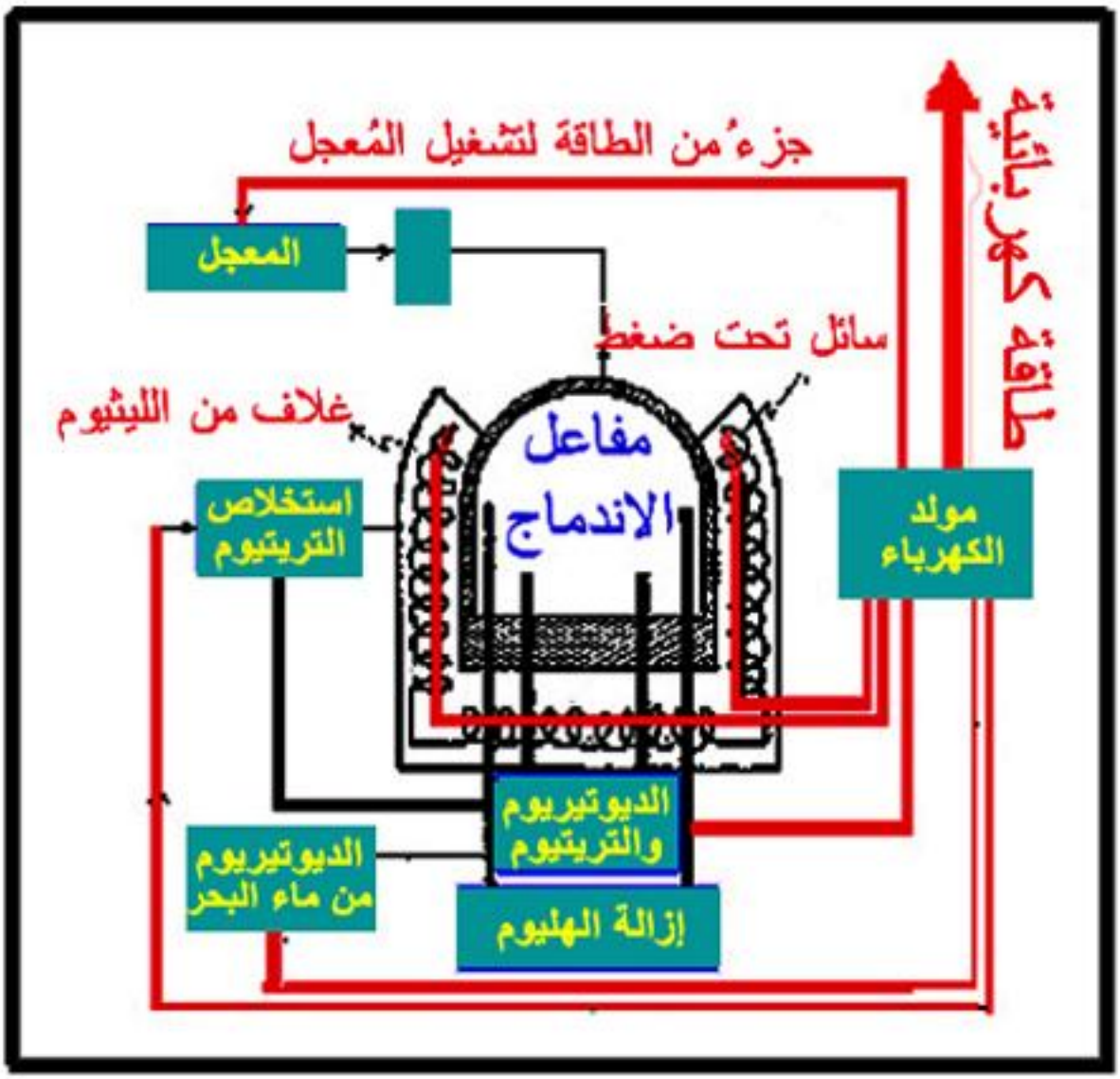


شكل (3-1) مفاعل انشطار

ب/ مفاعلات الاندماج النووي :

إن مفاعلات الاندماج النووي تعتمد على إندماج النوي الخفيفة و هذه المفاعلات مازالت قيد التطوير حاليا للإستفادة منها مستقبلا في توليد الطاقة شكل (3-2) (1) .

شكل



مفاعل الاندماج النووي

شكل(3-2) مفاعل الاندماج النووي

(1.1.3)المفاعلات النووية الإنشطارية :-Fissions Nuclear Reactor Classification

تصنف المفاعلات حسب عدة قواعد منها :

1- التصنيف حسب طاقة النيوترون:-

أ/ المفاعلات السريعة :-

إن أغلبية الإنشطارات يحدث بواسطة طاقة النيوترونات السريعة ، ويكون معدل الطاقة عدة مئات من الكيلو الكترون فولت .

ب/ المفاعلات الحرارية :-

إن أغلبية الإنشطارات تحدث بواسطة النيوترونات الحرارية .

ت/ المفاعلات المتوسطة :-

والانشطارات في هذا النوع تحدث بواسطة النيوترونات ذات الطاقة المتوسطة .

2- التصنيف حسب التركيب (الشكل العام) لقلب المفاعل :-

أ/ المفاعلات المتجانسة :-

في هذا النوع فإن الوقود والمهدئ يكونان محلولا متجانسا .

ب/ المفاعلات المتغايرة أو اللامتجانسة :-

في هذا النوع فإن الوقود يشتمل على عناصر مستقلة عن المهدئ الذي يكون مادة سائلة أو صلبة .

3- التصنيف حسب إمكانية إنتاج مواد جديدة قابلة للإنشطار :-

أ/ مفاعلات محولة :-

وهي تلك التي تنتج مواد قابلة للإنشطار أقل مما تستهلك ، وتعتبر كل مفاعلات اليورانيوم ضمن هذه المجموعة .

ب/ المفاعلات المولدة :-

وهي التي تنتج مواد قابلة للإنشطار أكثر مما تستهلك ، وكمثال المفاعلات الحرارية و المفاعلات السريعة التي تشتغل على القاعدة نفسها .

4- تصنيف المفاعلات حسب التطبيقات :-

أ/ مفاعلات إختبارية :-

مثل المفاعلات الضوئية – متعلقة بدرجة الصفر الحرارية.

ب/ المفاعلات الاثباتية :-

وهي المخصصة لتقديم الدلائل والبراهين العلمية والمفاعلات البدائية ، النمازج الاولية للمفاعلات .

ت/ المفاعلات المقامة لغرض التدريب :-

إن المفاعلات التدريبية – التعليمية الصغيرة المبنية لحساب بعض الجامعات تقوم بمهام التدريب لعلماء المستقبل في الصناعات النووية ، بجانب تقديمها للأبحاث العلمية المفيدة ، وفي البلدان الصغيرة يمكن أن تتحول المفاعلات التدريبية إلى مفاعلات متعددة الأغراض ، يعود ذلك إلى إمكانية تحوير تصميمها للإيفاء بالأغراض المطلوبة ، على سبيل المثال فإن المفاعل النووي نوع (تريجا – 2) الذي بني في المعهد الذري لجامعة فيينا بالنمسا يعتبر من هذه الأنواع ذات الأغراض المتعددة (شكل 2 – 1) .

إن هذا المفاعل إضافة إلى أنه مخصص للإبحاث ، فإنه ينتج طاقة تبلغ من 250 كيلو واط إلى 25 ميجا واط ، كما إن المفاعل النووي الإختباري لجامعة التقنية في بودابست والذي صمم في مركز الأبحاث الفيزيائية و الكيميائية لأكاديمية العلوم المجرية ، إضافة إلى إستعمالاته في الابحاث أصبح قادرا بعد تحويره على إنتاج (الوقود الحرج) منذ سنة 1971م .

ث/ مفاعلات القدرة أو مفاعلات الطاقة :-

المجموعة الاخيرة من المفاعلات التي تسمى بمعددة الأغراض نظرا لعدم وضوح المهمة وفي الوقت الحالي فإن أغلب المفاعلات المنتجة في العالم تعود إلى النوع الحراري المتغاير ، نظرا لانها وأعدة فيما يتعلق بالتطبيقات المستقبلية .

كما أن مفاعلات الأبحاث و التدريب تعتبر على قدر كبير من الأهمية ، لأن أغلب تجارب الفيزياء النووية والنيوترون وأبحاث الكيمياء الأشعاعية تنجز بواسطة هذا النوع من المفاعلات ، بالاضافة إلى إستعمالها كمصدر للنيوترون .

(2.1.3) مفاعلات الاندماج النووي :-

المفاعل من هذه المفاعلات يحتوي على خليط من التريتيوم و الديتريوم وبعد حدوث الاندماج النووي تنطلق نيوترونات تصطدم بجدار المفاعل المغلف بمادة الليثيوم فيتكون خليط من التريتيوم والهليوم وترتفع درجة حرارة جدار المفاعل لدرجات عالية ، يفصل بعد ذلك الهليوم ثم يعاد التريتيوم داخل المفاعل .

ولتوليد الكهرباء تستغل الحرارة الناتجة في جدار المفاعل في تسخين سائل وتحويله إلى بخار مضغوط يستخدم في إدارة التوربينات لتوليد الكهرباء .

- مميزات مفاعل الاندماج النووي :

يتميز هذا المفاعل ببساطته وإنتاجه طاقة نظيفة غير ملوثة للبيئة ولكن ما زالت البحوث جارية في العديد من دول العالم من أجل صناعة هذا النوع من المفاعل.

- صعوبات صناعة مفاعل الاندماج النووي :

هناك ثلاث صعوبات رئيسية تعترض هذا الهدف :-

- توليد درجة حرارة كافية لبدء التفاعل .

- بناء وعاء يضم تفاعلا يحدث عند درجات حرارة تقاس بعدة ملايين ، فجميع المواد المعروفة كلها تنصهر وتتبخر عند هذه الحرارة شديدة الإرتفاع .

- إستخلاص الحرارة الناتجة من التفاعل .

ولقد توصل العلماء إلى بلوغ درجة الإشتعال للتفاعل الإندماجي في فترة صغيرة جدا و اصبحة المشكلة هي زيادة الفترة .

كذلك مشكلة الوعاء الذي يضم هذا التفاعل قد تم تحقيقه جزئيا باستخدام المجالات المغناطيسية كجدران لأوعية هذه التفاعلات (الآلة الأنبوبية) [9] .

جدول (3-1) يوضح بعض أنواع المفاعلات وخصائصها " ما تتميز به "

اسم المفاعل	رمز المفاعل	خواصه الاساسية
مفاعل الماء المغلي	BWR	يبرد بالماء و ضغطه أقل من ألف (رطل انش$^{-2}$) وحرارته أقل من 500 درجة مئوية .
مفاعل الماء المضغوط	PWR	يبرد بالماء المضغوط ويصفح بالزركونيوم المعالج .
مفاعل الماء الثقيل	HWR	يبرد بالماء الثقيل ويستعمل الماء الثقيل كمهدئ ويصفح بالزركونايل.
المفاعل الروسي	VVER	يبرد بالماء المضغوط .
مفاعل الحرارة العالية والمبرد بالغاز	HTGR	يستعمل الجرافيت كمهدئ واليورانيوم المخصب بدرجة عالية كوقود ويبرد بواسطة غاز الهليوم
مفاعل اليورانيوم – ديوتيريوم (كاندو) الكندي	CANDU	يستعمل الماء الثقيل كمهدئ ووقود اليورانيوم ، ومن مميزاته أنه يمكن تحميله بالوقود وتفريغه أثناء العمل ووقوده مصفح بسبيكة الزركونايل
مفاعل التوليد السريع	LMFPR	يعمل بدون مهدئ ويستعمل مادة الصوديوم السائلة كمبرد ومصفح بالتتاليوم ووقوده البلوتونيوم المحاط باليورانيوم الطبيعي أو اليورانيوم المخفف من النظائر المنشطرة .

المفاعل الطبيعي	NR	يعمل باليورانيوم الطبيعي
مفاعل التوليد	LWBR	يبرد بالماء الخفيف
مفاعل الاندماج بالليزر	LFR	يستعمل حزمة الليزر في حث الإندماج
مفاعل هجيني	HF-FR	يستعمل طريقتين الإنشطار والإندماج
مفاعلات التبريد الغاذي	GCR	تستعمل الغاز كمبرد

الفصل الرابع

مفاعلات الماء الخفيف

مقدمة :

في عام 1957م قررت الطاقة الذرية الأمريكية الأهتمام بنوعين من المفاعلات تعتمد على الماء الخفيف هما :- مفاعلات الماء المضغوط ، مفاعلات الماء المغلي حيث يستخدم الماء الخفيف (العادي) كمهدئ للنيوترونات و كمبرد لقلب المفاعل لإستخلاص الطاقة الحرارية والاستفادة منها ، وقد تركت هيئة الطاقة الذرية الباب مفتوحا للقطاع الخاص في تطوير مبدأ إستخدام الماء الخفيف لما لها من خصائص متميزة. و نظرا لإحتمال إمتصاص الماء العادي للنيوترونات يكون من الضروري إستخدام اليورانيوم المخصب كوقود ، الأمر الذي يؤدي إلى أمكان تصميم المفاعل بحيث تكون كثافة القدرة المتولدة عالية مما يجعل حجم المفاعل صغيرا لنفس القدرة الحرارية.

(1.4) خصائص الماء الخفيف :

- فهو رخيص الثمن .
- متوفر بكمية كبيرة .
- ناقل جيد للحرارة .
- وسط جيد ايضا لتهدئة النيوترونات .

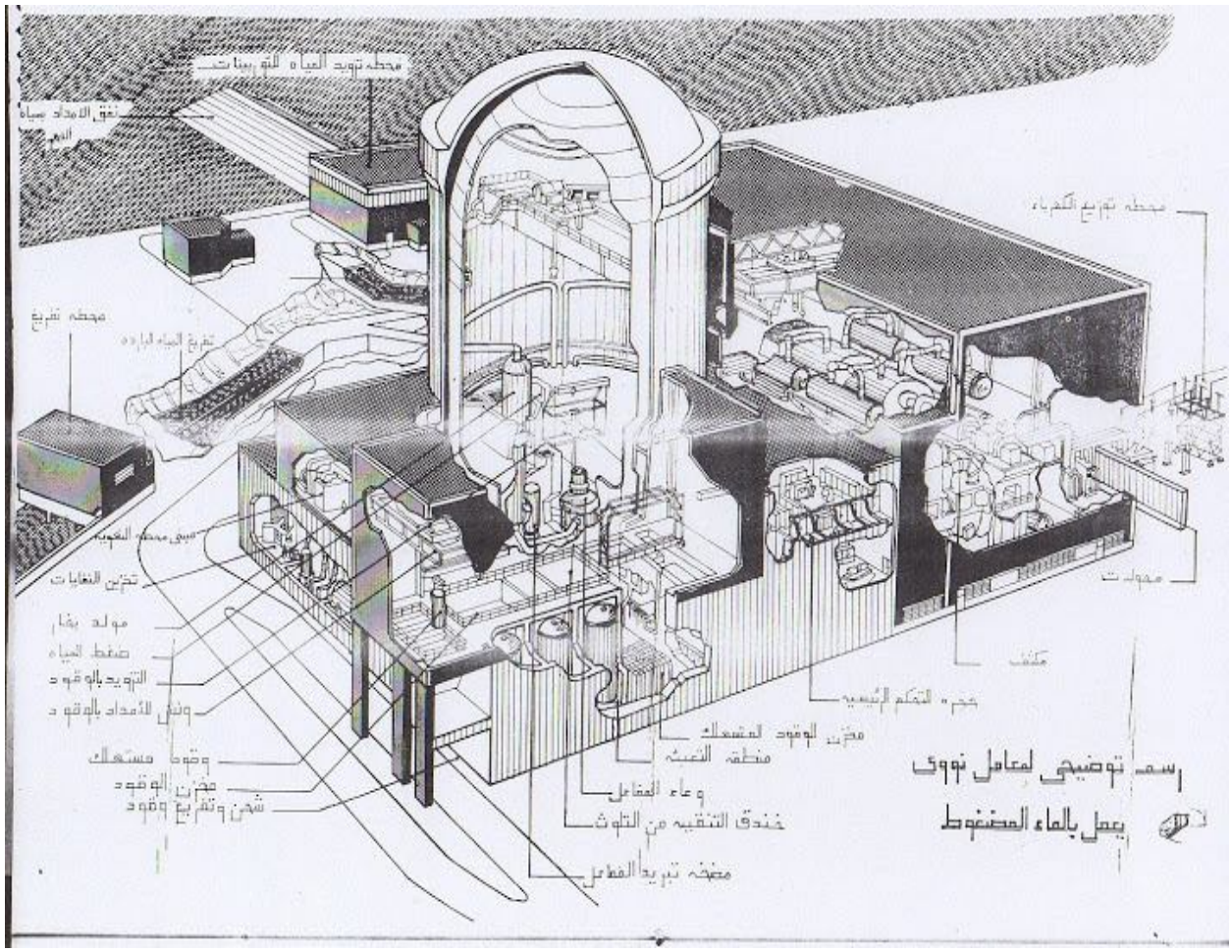
(2.4) مميزات مفاعلات الماء الخفيف:

- بناؤها أقل تكلفة وأحجامها أصغر من المفاعلات الأخرى .
- كفاءتها العالية نسبيا.

(3.4) مفاعلات الماء المضغوط: Pressurized Water Reactor (PWR)

شكل(4-1) يوضح مفاعل نووي يعمل بالماء المضغوط ،وإن مفاعلات الماء المضغوط هي من أكثر المفاعلات شيوعا في العالم حيث يوجد أكثر من 230 من محطات الطاقة النووية وبضع مئات منها مستعملة في الغواصات أو المدمرات العسكرية [1].

وتوجد فيها دورتان للماء ، الأولى مغلقة تماما لنقل الحرارة من قلب المفاعل إلى دورة الماء الثانية والتي تنقلها بدورها إلى التربينات ، ففي الدورة الأولى يظل الماء سائلا خلال الدورة كلها ، ويخرج من غلب المفاعل في درجة حرارة تبلغ حوالي 325 درجة مئوية و تحت ضغط يبلغ حوالي 150 ضعف الضغط الجوي ليمر من خلال دورة الماء الثانية التي يتم فيها توليد البخار و توجيهه لإدارة التربينات ثم تكثيفه وإعادته مرة أخرى إلى بداية هذه الدورة ، ووجود الدورة الثانية التي لا يلامس فيها الماء الوقود النووي يرفع من درجة الأمان الإشعاعي ويمنع إنتقال أية نظائر مشعة من قلب المفاعل إلى التربينات ، ولكن من ناحية أخرى يزيد الضغط و تزيد درجة الحرارة في قلب المفاعل عن مفاعلات الماء المغلي [10].



شكل(4-1) يوضح مفاعل نووي يعمل بالماء المضغوط

(1.3.4) أجزاء مفاعل الماء المضغوط:

يتالف مفاعل الماء المضغوط من الأجزاء التالية (أنظر الشكل (4-2)) :

1/ المنظومة الإبتدائية لمحطة القوى النووية :

هذه المنظومة كما موضح في الشكل (4-2) تحتوي على:

1 - المفاعل.

2- المرجل (الغلاية)أو مولد البخار.

3- المضخة الدوارة.

4- مضخة ذات آلية تحكم

2/ المنظومة الثانوية لمحطة القوى النووية:

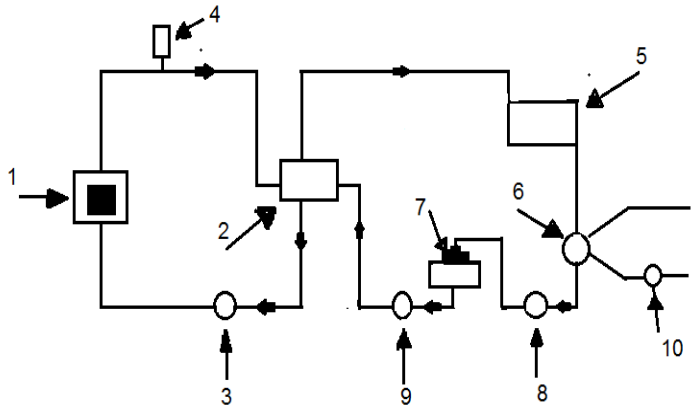
هذه المنظومة كما موضح في الشكل (4-2)هي:

5- التوربينات .

6- المكثف.

7- وحدة إزالة الغازات.

8،9،10- مضخاة مساعدة .



مخطط يوضح قوى نووية تعمل بالماء المضغوط (كمبرد)

شكل (4-2) مخطط يوضح قوى نووية تعمل بالماء المضغوط (كمبرد)

(2.3.4) طريقة عمل مفاعلات الماء المضغوط :

في محطات القوى النووية التي تستعمل مفاعلات يتم تبريدها بواسطة الماء المضغوط تكون الفكرة هي أن الماءالبارد يوضع تحت ضغط عالي جدا للحيلولة دون تبخره، ويعمل ماء في المفاعل عمل المهدئ ، إن أبسط مخطط لمثل هذا النوع من المفاعلات موضح في الشكل (4-2) وتصل حرارة الماء في بعض الأحيان إلى 800 درجة مئوية في المفاعل (1) وتنفذ الحرارة إلى المرجل (الغلاية) (2) وعندما تبرد إلى حوالي 270 أو 290 درجة مئوية وتعاد إلى المفاعل بمساعدة مضخة دوارة (3) .

إن المنظومة التي يحتويها المفاعل و المتكونة من المرجل (الغلاية) والمضخة الدوارة ، تسمى بالمنظومة الإبتدائية لمحطة القوى النووية ، ويتم الحفاظ على ضغط مستمر و ثابت عند الحد المطلوب في المنظومة الإبتدائية بواسطة مضخة خاصة ذات آلية تحكم (4) .

إن البخار المشبع المتكون في (الغلاية) عند ضغط 40 إلى 60 بار (حيث البار هو وحدة قياس ، تعادل مليون داين من السنتمتر المربع) ذلك البار يتم توجيهه إلى التوربينات (آلة توربينية ذات زعانف دوارة (5)) ومن ثم يوجه البخار إلى المكثف (6) حيث يكثف بواسطة الماء البارد المنقول بواسطة المضخة (10) .

يعاد الماء المكثف بعد ذلك إلى المرجل (الغلاية) (2) بمساعدة الضخات (9) و (8) بعد أن يمر من خلال وحدة إزالة الغازات (7) و كذلك المسخن المتقدم الذي لم يظهر في المخطط .

إن المنظومة المتكاملة المغلقة المتكونة من الوحدات (5) و (6) و (7) و (8) و (9) و (10) تسمى المنظومة الثانوية لمحطة القوى النووية .

(3.3.4) الوقود:

إن الوقود المستخدم في مثل هذه المفاعلات يتألف مما يقارب من 40 إلى 80 طن من اليورانيوم منخفض التخصيب ، حيث يتم تغيير ثلث هذه الكمية كل سنة .

(4.3.4) المهدئ :

تستخدم هذه المفاعلات من هذا النوع الماء الخفيف كمهدئ للنوترونات .

(5.3.4) المبرد :

تستخدم هذه المفاعلات من هذا النوع الماء الخفيف كمبرد لقلب المفاعل .

(6.3.4) القوة الناتجة :

إن القوة الناتجة من كل وأحد ديسميتر مكعب في قلب المفاعل هي 100 كيلوواط .

(7.3.4) الطاقة النوعية الناتجة :

إن الطاقة النوعية الناتجة التي يمكن أن يصل إليها المفاعل هي حوالي 30 إلى 40 جيجاواط يوميا لكل طن من الوقود .

(8.3.4) فعالية المفاعل :

إن فعالية المفاعل من هذا النوع تصل إلى 33% .

(9.3.4) مميزات مفاعلات الماء المضغوط :

- سعة الإتزان الديناميكي لمسايرة تغير الأحمال .

- وصول البخار النظيف إلى التوربين حيث يتم تحويله إلى غاز في المبادل الحراري و ليس في قلب المفاعل حيث الوقود النووي ، و لذا لا يمكن أن يتلوث بخار الماء بالمواد المشعة .

- أعمدة التحكم تكون من أعلى مما يجعل من مفاعلات الماء المضغوط أكثر أنواع المفاعلات أمانا فلو حدث أن تعطلت الأجهزة الميكانيكية لأعمدة التحكم فإنها تعمل ذاتيا تحت تأثير وزنها[1].

(10.3.4) عيوب مفاعلات الماء المضغوط :

- تكاليف وعاء الضغط في مفاعلات الماء المضغوط عالية نسبيا .

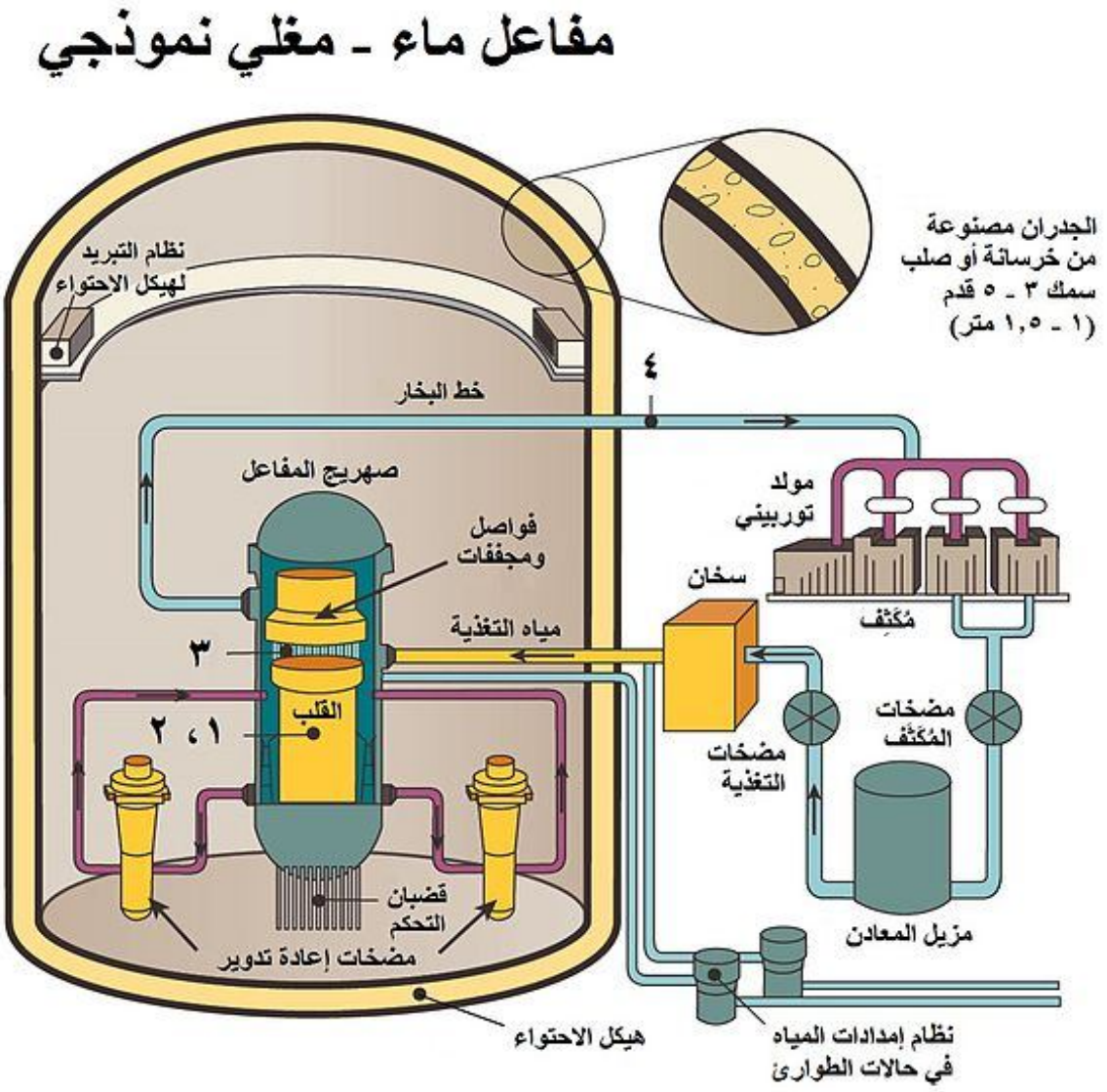
- وجود المبادل الحراري وملحقاته يجعل من محطة مفاعل الماء المضغوط أقل كفاءة و أعلى تكلفة من محطة الماء المغلي .

بالرغم من هذه العيوب فإن هناك خطة لتعميم إستخدام هذا النوع من المفاعلات في الغواصات والسفن النووية .

(4.4) مفاعل الماء المغلي:-

إعتقد العلماء ولفترة طويلة من الزمن ، أنه إذا غلي الماء داخل المفاعل فإن ذلك سيسبب أضرارا كبيرة فيه ، لأن التجارب التي أجريت في بدايات الخمسينيات أثبتت أن حركة فقاعات الماء تكون غير منتظمة إذا غلي الماء تحت ضغوط صغيرة و هذه تضر بالمفاعل .

و لكن ظهر أخيرا أن هذه الحركة تنتظم ويصبح الغليان مستقرا عند رفع الضغط . منذ ذلك الحين بدأ هذا النوع من المفاعلات يتطور و أصبح في الوقت الحاضر من المفاعلات التجارية المعروفة (أنظر الشكل (4-3) [11] .



شكل (4-3) مفاعل الماء المغلي

(1.4.4) أجزاء مفاعل الماء المغلي:

يتالف مفاعل الماء المغلي من الأجزاء التالية (أنظر الشكل (4-4)) :

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

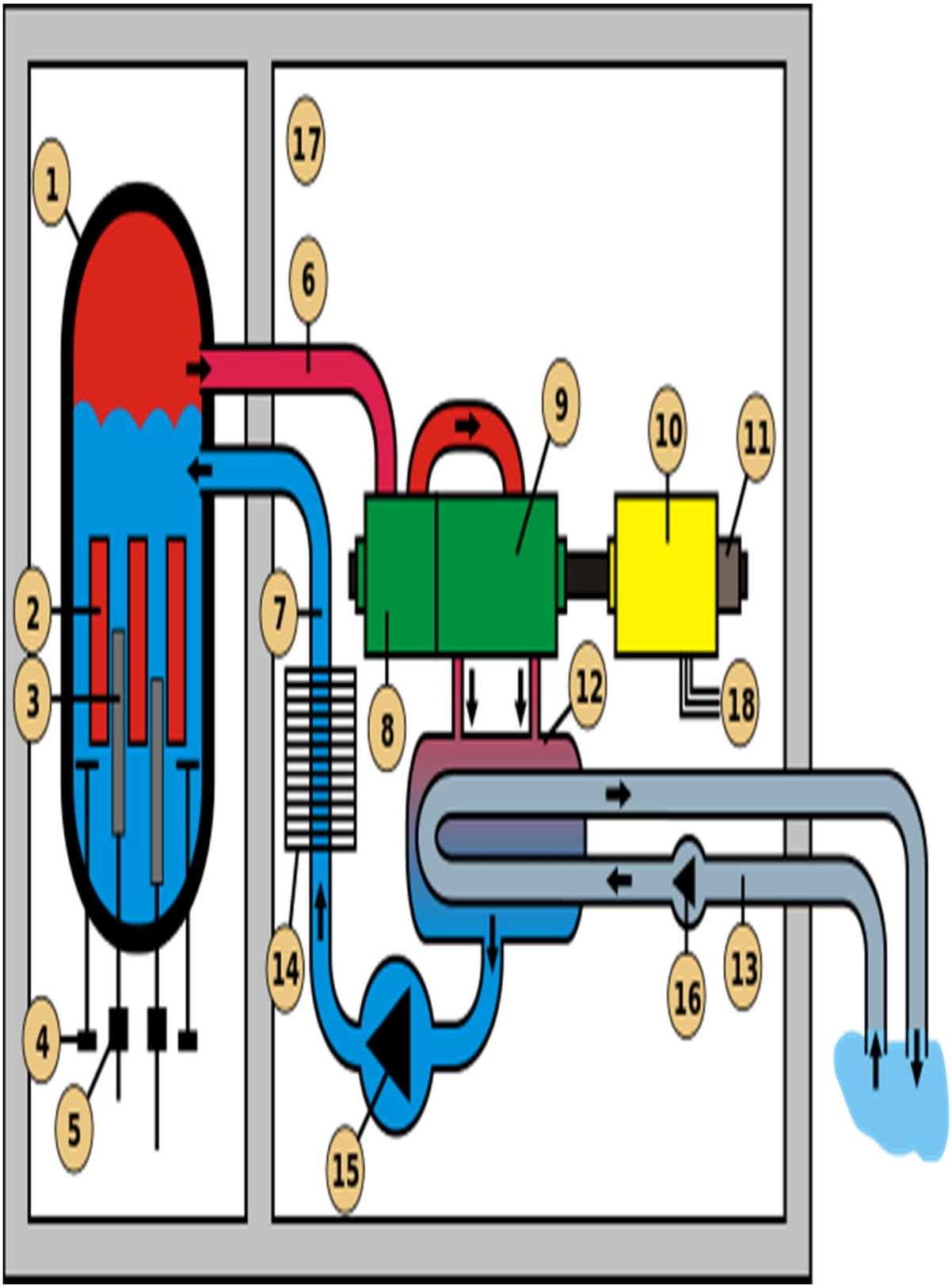
12- مكثف البخار

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 المبنيان ذو حائط خرساني بسُمك من 1 إلى 1.5 متر تتحمل الاصطدام بطائرة 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[12].



شكل (4-4) أجزاء مفاعل الماء المغلي

(2.4.4) طريقة عمل مفاعلات الماء المغلي :

يضخ الماء الساخن الذي سبق تسخينه إلى خزان الضغط للمفاعل والذي هو معزول بواسطة بناية الحجز عن باقي مباني المفاعل، ويوجد في خزان الضغط صندوق وحدات الوقود المصنوع من ثاني أكسيد اليورانيوم المُخصب بنسبة 2.6% باليورانيوم-235، ويكون خزان الضغط ممتلئاً إلى نحو ثلثيه بالماء، ويؤدي التفاعل الانشطاري إلى إطلاق حرارة تعمل على رفع درجة حرارة الماء وتكون بخار الماء، فيرتفع الضغط في خزان الضغط إلى 71 ضغط جوي كما ترتفع درجة الحرارة إلى 276 درجة مئوية، ويقوم هذا البخار المتولد في خزان الضغط بتحريك التوربين. 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.

وتبلغ كمية البخار 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 التحكم على ضبط قدرة المفاعل، وتكون قضبان التحكم مصنوعة من كربيد البورون أوعنصر الكادميوم ، وعند توقيف جميع طلمبات ضخ المياه إلى خزان الضغط تنخفض قدرة المفاعل إلى نحو 30% إلى 40 % من قدرته الأساسية، وتسمى تلك الدورة المنخفضة القدرة نقطة الدورة الطبيعية.

وتكون كفاءة عمل مفاعل الماء المغلي أقل قليلاً من كفاءة مفاعل الماء المضغوط. وتبلغ كفاءة توليد الكهرباء نحو 35 %.

(3.4.4)الوقود :

إن الوقود المستخدم في مثل هذه المفاعلات هو في العادة وقود ثاني أكسيد اليورانيوم – 235 بنسبة 2.6% المغلف بسبيكة الزركونيوم .

(4.4.4) المهدئ :

تستخدم هذه المفاعلات من هذا النوع الماء الخفيف كمهدئ للنوترونات .

(5.4.4) المبرد :

تستخدم هذه المفاعلات من هذا النوع الماء الخفيف كمبرد لقلب المفاعل .

(6.4.4) الأمان(السلامة):

يعمل التوربين في مفاعل الماء المغلي بالبخار القادم مباشرة 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 بمعنى 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 والتوربينات هي أيضا 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 النظام 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 البورون، 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، وتوقف على الفور للتفاعل النووي[12].

(7.4.4) أنواع مفاعلات الماء المغلي:

- الجيل الأول:

أنشأ الجيل الأول للمفاعلات في ألمانيا من مفاعلات الماء المغلي بالعمل المشترك بين جينرال إلكتريك وشركة AEG الألمانية في الخمسينيات والستينيات من القرن الماضي. وقد قامت الشركتان ببناء 4 مفاعلات آنذاك من هذا النوع. وقد انتهت مدة تشغيل تلك المفاعلات وهم 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 الألمانية 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 سرعتها فوق الصوت من دون أن يصاب المفاعل نفسه بخلل. صنعت أربعة مفاعلات من هذا الطراز في ألمانيا وهي لا تزال تعمل، وآخرهم من هذا النوع مفاعل كروميل قرب هامبورج وهو أكبر مفاعل ماء مغلي في العالم.

- 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.

- تطور عام 2009:

قامت شركة أريفا Areva NP الفرنسية بالاشتراك مع شركة E.ON الألمانية بتطوير مفاعل جيد اعطوه اسم KERENA وهو تطوير لطراز 72، وهو من نوع مفاعل الماء المغلي وذو قدرة تصل إلى 1250 ميجاوات. وقد أعربت ولاية برونسفيك ب كندا إلى شركة أريفا عن عزمها في طلب بناء واحد من مفاعلات النوع الجديد KERENA[12].

(8.4.4) مميزات مفاعل الماء المغلي :

- عدم وجود لمبادل الحراري و دأئرة التبريد الثانوية مما يجعل من مفاعل الماء المغلي أعلى كفاءة ، وأقل تكلفة من مفاعل الماء المضغوط .

(9.4.4) عيوب مفاعلات الماء المغلي:

- التوصيل المباشر بين المفاعل والتوربين يقلل من الأتزان الديناميكي للمفاعل و قابليته لمسايرة تغير الأحمال .
- دخول البخار مباشرة إلى التوربين و هذا البخار ملوث بالإشعاع و بالتالي إحتمال تلوث التوربين وتصبح عمليات الصيانة صعبة .
- عدم إنتظام فقاعات الغاز أثناء غليان الماء و مشاكل الأنتقال الحراري المصاحبة لها [1].

(5.4) الخاتمة:

أن مفاعلات الماء الخفيف يمكن الإستفادة منها في إنتاج طاقة رخيصة الثمن وذات كفاءة عالية نسبيا وتحويل هذه الطاقة الى طاقة كهربية ، كما يمكن إستخدام هذه المفاعلات في العديد من المجالات الأخرى حيث يمكن أستخدامها في التطبيقات الصناعية والطبية وكذلك تستخدم في الغواصات والسفن البحرية كما تستخدم في تخصيب اليورانيوم الذي يستخدم في صناعة الأسلحة النووية .

وبذلك نجد أن مفاعلات الماء الخفيف لها مفهوم سلمي أكثر ما هو تدميري كما عليه مفهوم العديد من الناس حيث يعتقدون أن الطاقة النووية أو المفاعل النووي لا يستخدمان إلا للأغراض غير السلمية وبذلك نكون قد غيرنا المفهوم الخاطئ لمفهوم المفاعل النووي.

(6.5) التوصيات :

من خلال دراستنا لهذا البحث يمكننا أن نوصي بالتي :

- أولا عند بناء مفاعل نووي لابد من أخذ الحيطة و الحذر في إختيار موقع مناسب للمفاعل ، أي أن يكون المفاعل بعيدا عن المناطق السكنية ، وكذلك بعيدا عن مواقع الحياة البرية تجنبا للحوادث التى قد تحدث ، فيصاب بها الناس والحيوانات التي تتواجد بالقرب من الحادث .
- أن يوضع للعاملين المتواجدين في المفاعل برنامج للوقاية من الإشعاع تجنبا للتسرب الإشعاعي في بعض المناطق .
- الكشف الدوري للمفاعل أي أن يكون هنالك جهات مختصة بالكشف عن الإشعاع و كذلك جهات مختصة بالصيانة الدورية لتلاشئ الأخطأ الصغيرة حتى لا يتم تفاقمها وتصبح فيما بعد كبيرة ولا يمكن تداركها وتؤدي إلى كوارث بيئية .
- كذلك إنشاء مفاعل من مفاعلات الماء الخفيف لما فيها من خصائص متميزة .

المراجع

(1) د/ أحمد الناغي & د/ محمود نبيل يس البكري - 2008م - الفيزياء النووية – دار الفكر العربي القاهرة

(2) http://enc.kacemb.com/%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%88%D9%88%D9%8A%D8%A9/#1

(3) علاء هاشم مناف – 2012م – نسبية الزمكان في هندسة الفيزياء النووية دراسة تحليلية –دار صفاء للنشر _عمان

(4) أ.د عذاب طاهر الكناني - 2009م - الفيزياء النووية والطبية - دار الفجر للنشر والتوزيع القاهرة

(5) http://www.4electron.com

(6)http://www.shakwmakw.com/vb/showthread.php?t=455805

(7) http://ency.kacemb.com/المفاعل-النووي/

(8) http://enc.kacemb.com/%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-/%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%88%D9%88%D9%8A%D8%A9

(9) المهندس / بدوي محمود الشيخ – الموسوعة النووية –دار المعارف – القاهرة – ج.م.ع

(10) د/ ممدوح عبدالغفور حسن- 2000م - الثقافة النووية للقرن 21 - دار الفكر العربي (القاهرة).

(11) . د. عبدالحكيم طه قنديل - 2003 م - النواة و الإنشطار النووي – دار الفكر العربي – القاهرة .

(12) https://ar.wikipedia.org/wiki