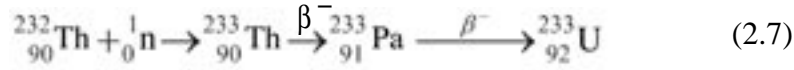


النووي وفقاً للتفاعل:



وعلى ذلك، فإنه يمكننا أن نخلص إلى أن هناك أربعة نظائر انشطارية هي اليورانيوم ٢٣٣ (عمر النصف 1.59×10^5 سنة) و اليورانيوم ٢٣٥ (عمر النصف 7.04×10^8 سنة) والبلوتونيوم ٢٣٩ (عمر النصف 2.41×10^4 سنة) والبلوتونيوم ٢٤١ (عمر النصف ١٤,٤ سنة). وكما هو واضح، تتمتع هذه النظائر بأعمار نصف طويلة مما يجعلها ملائمة لتطبيقات إنتاج الطاقة. والنظيران الخصبان (القابلان للانشطار) الموجودان في الطبيعة اللذان يقودان إلى إنتاج النظائر الصناعية القابلة للانشطار هما اليورانيوم ٢٣٨ والثوريوم ٢٣٢.

مواد المفاعلات النووية Materials for Nuclear Reactors

المفاعل النووي هو أداة تسمح بحدوث تفاعل انشطار تسلسلي يمكن التحكم به بطريقة يتم بها إنتاج الطاقة أو النيوترونات للأغراض البحثية أو لإنتاج النظائر. والمواد الأساسية في المفاعل النووي هي:

- ١- الوقود النووي الذي يحافظ على استمرار تفاعل الانشطار التسلسلي.
- ٢- المهدئ، وذلك لتهدئة وتبطئة النيوترونات السريعة لتحسين احتمالية حدوث التفاعل الانشطاري.
- ٣- الغلاف الذي يحوي أقراص أو قضبان الوقود بحيث تبقى نواتج الانشطار النشطة إشعاعياً حبيسة تفادياً لانطلاقها للبيئة.
- ٤- المبرد، وذلك لامتصاص الحرارة الناتجة عن التفاعل النووي.
- ٥- عناصر التحكم، وذلك لامتصاص النيوترونات والتحكم في معدل حدوث الانشطار التسلسلي.

مواد الوقود Fuel Materials

يوجد الوقود النووي في قلب المفاعل. ويجب أن يعطى الوقود الاهتمام الكافي عند تصميمه، بحيث يضمن هذا التصميم عدم إخفاق الوقود خلال سنة أو سنتين من وجوده في المفاعل. ومعظم الطاقة في المفاعل النووي يتم انتاجها بواسطة انشطار اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم 239 . وخلال عملية إنتاج الطاقة فإن نسبة تتراوح بين ٠,٥ إلى ١٠٪ من اليورانيوم أو البلوتونيوم هي التي تخضع للانشطار (يعتمد هذا على درجة الإثراء). ويغلف الوقود بمواد خاصة وذلك لمنع نواتج الانشطار من الوصول إلى نظام التبريد. ويمكن ضمان التوافق بين مادتي الوقود والتغليف سواء من الناحية الفيزيائية أو الكيميائية، وذلك بالاختيار الموفق لهاتين المادتين. وفي معظم المفاعلات في الوقت الحاضر، فإن أكسيد اليورانيوم أو فلز اليورانيوم هما المادتان المستخدمتان كوقود. والهدف الرئيس من تصميم الوقود هو استخلاص أقصى قدرة وكذلك أقصى طاقة من الوقود دون إخفاق. وقد ضمنت التصاميم الحالية للوقود النووي عدم إمكانية حدوث إخفاق كلي للوقود، مع بذل الجهود المستمرة لخفض احتمال حدوث أي خلل ثانوي يمكن أن يحدث في أقل من ٠,٠٥٪ من قضبان الوقود.

ويسمى معدل استخلاص الطاقة من الوقود بالقدرة النوعية لذلك الوقود. وتقاس القدرة النوعية بدلالة الميجاوات من الطاقة الحرارية (MWt) الناتجة لكل طن من الوقود. وعلى ذلك فإن القدرة النوعية هي مقياس كذلك لكمية الوقود المستخدم في مفاعل ما. وتصنع عناصر الوقود عادة على شكل قضبان أسطوانية بحيث تنتج الطاقة الانشطارية من خلال مقاطعها العرضية. ويعتمد معدل إنتاج الطاقة على كثافة الوقود وعلى تركيز الذرات الانشطارية. ويتم استخلاص الطاقة الناتجة من الوقود بواسطة المبرد وذلك عن طريق السطح

الخارجي لمادة التغليف. وبرغم أنه يتم تبريد سطح عنصر الوقود، إلا أن الجزء الداخلي أو مركز العنصر يبقى ساخناً. ويتطلب تصميم الوقود ضمان عدم انصهار القلب أو تغير طوره أثناء انتاج الطاقة، وذلك لأن تغير الطور يمكن، في بعض الأحيان، أن يسبب ضغطاً على أنبوبة مادة التغليف. هذا يشبه إلى حد كبير ما نواجهه في حياتنا اليومية حين نترك زجاجة مشروب بارد في منطقة التجميد في الثلاجة المنزلية مما يؤدي إلى تكون الثلج حولها ومن ثم حدوث شرخ في جدران الزجاجة. ولأن الجزء المركزي للوقود هو الأكثر حرارة، فإن درجة حرارته يجب أن تبقى دون درجة الانصهار أو درجات التحولات الطورية للوقود.

مواد التهدة Moderator Materials

سبق الإشارة إلى أن النيوترونات الحرارية هي أكثر فعالية في حفظ تفاعل الانشطار التسلسلي. وتتم التهدة باستخدام مهدئات تقوم بتبطئة النيوترونات بواسطة التصادمات المرنة بين النيوترونات ونوى المواد المهدئة. والمهدئات ذات الذرات صغيرة الكتلة هي الأكثر كفاءة، بشرط أن لا تمتص فيها النيوترونات أثناء عملية التهدة. والمهدئات الأكثر استخداماً في المفاعلات النووية هي الماء الخفيف (H_2O ، أي الماء الطبيعي)، والماء الثقيل (D_2O)، والجرافيت. وتتطلب تهدة نيوترونات الانشطار، التي تنطلق غالباً بطاقة ١ م.إ.ف.، إلى مستوى الطاقة الحرارية (٠.٠٢٥، ١٠.٠ م.إ.ف.). ١٨ تصادماً مع ذرات الهيدروجين، أو ٢٤ تصادماً مع ذرات الديتيريوم، أو ١١١ تصادماً مع ذرات الكربون (الجرافيت). ورغم أن الماء الخفيف فعال جداً في تهدة النيوترونات، إلا أنه ليس أفضل المهدئات وذلك نظراً لأن لديه شراهة لامتصاص النيوترونات أعلى منها في المهدئات الأخرى ($\sigma_a = 0.33 \text{ b}$) ولهذا السبب، فإن الماء الطبيعي غير ملائم في حالة مفاعلات وقود اليورانيوم الطبيعي. وفي المقابل، فإن الديتيريوم ($\sigma_a = 0.0005 \text{ b}$)، والكربون ($\sigma_a = 0.003 \text{ b}$) يمكن استخدامهما كمهدئين مع

وقود اليورانيوم الطبيعي. أما البريليوم ($\sigma_a = 0.0095 \text{ b}$) فإنه أيضاً مهدئ جيد لكن سميته تحد من استخدامه بشكل واسع.

مواد التغليف *Cladding Materials*

يغلف الوقود النووي، سواءً كان في صورة فلز اليورانيوم (على شكل قضبان) أو أكسيد اليورانيوم (على شكل حبيبات)، بأنابيب فلزية من مادة تغليف مناسبة. والخصائص التي يجب أن تتوفر في مادة التغليف هي:

- ١- المتانة العالية.

- ٢- التوافق الكيميائي الجيد مع الوقود ومع مادة التبريد.

- ٣- احتمالية (مقطع عرضي) منخفضة لامتصاص النيوترون.

وفي مفاعلات الأبحاث، تستخدم سبائك الألومنيوم كمادة تغليف للوقود. أما في مفاعلات القدرة، فإنه يستخدم لهذا الغرض، وبشكل واسع، سبائك المغنيسيوم (ماغنوكس) والزركونيوم (سبيكة الزركونيوم ٢ أو ٤). وبرغم أن احتمالية امتصاص النيوترون في الفولاذ المقاوم للصدأ تعد عالية نسبياً ($\sigma_a = 2.7 \text{ b}$)، فإنه قد استخدم أيضاً كمادة تغليف وخاصة عندما تكون حرارة تشغيل الوقود أعلى من ٣٥٠ م.

مواد التبريد *Coolant Materials*

يجب أن يتوفر في مواد التبريد ما يلي :

- ١- أن تكون ذات سعة حرارية كافية للتخلص من الحرارة.

- ٢- أن تكون متوافقة كيميائياً مع مادة الوقود ومادة التغليف ومواد البناء المستخدمة.

- ٣- أن تكون ذات مقاطع عرضية منخفضة لامتصاص النيوترون.

وقد استخدم كل من الهيليوم وثاني أكسيد الكربون كمبردين غازيين. وعند

استخدام الماء الخفيف كمهدئ فإنه غالباً ما يكون هو المبرد برغم أنه يستخدم كمبرد أيضاً مع المهدئات الأخرى. وبطريقة مماثلة فإن الماء الثقيل يعمل كمبرد في عدد كبير من مفاعلات القدرة. وفي المفاعلات التي تعمل عند درجات حرارة مرتفعة (أعلى من ٣٥٠ م)، فإنه يستخدم لهذا الغرض فلز الصوديوم السائل وذلك عندما لا يكون هناك حاجة إلى التهدئة.

مواد التحكم Control Materials

في معظم المفاعلات لا يمكن استبدال الوقود أثناء استهلاكه. وبالتالي فإن كل دورة تشغيل للمفاعل تبدأ بكمية وقود تزيد بحوالي ٣٠٪ أكثر على الكمية اللازمة للمرحلة الحرجة الابتدائية. وفي غياب عملية تحكم ملائمة، فإن الزيادة قد تؤدي إلى مستويات قدرة غير مقبولة. وعملية التحكم هذه تتم بواسطة قضبان تحوي مواد ماصة للنيوترونات. وبهذا يتم التحكم بقدرة المفاعل ويمكن أيضاً بواسطتها إطفاء المفاعل. وتحوي القضبان عادة مادة البورون ($\sigma_a = 759 \text{ b}$) أو الكادميوم ($\sigma_a = 2450 \text{ b}$). ويستخدم البورون غالباً على شكل كربيد البورون (boron carbide)، أما الكادميوم، فيتم استخدامه على شكل فلز أو على شكل سبيكة مكونة من الفضة والكادميوم والإندسيوم (Ag-15% Cd-5% In). ويستخدم أيضاً الهافنيوم ($\sigma_a = 105 \text{ b}$) وذلك على شكل فلز. وعندما يراد تشغيل المفاعل فإن هذه القضبان تسحب بعيداً وبذلك يبدأ التفاعل التسلسلي وتزيد القدرة.

تاريخ المفاعلات History of Reactors

أكتشفت إمكانية إعداد نظام لتفاعل انشطار تسلسلي بواسطة جوليت كيوري وعدد من معاونين، وذلك عام ١٩٤٠ م باستخدام فلز يورانيوم كوقود، وماء خفيف وثقيل كمهدئات. وعلى كل حال فإن هذه الدراسة توقفت عام ١٩٤٠ م بسبب سيطرة الجيش الألماني على باريس. في الوقت ذاته كان فريتش في المملكة المتحدة قد توقع أنه من الممكن صنع قنبلة نووية باستخدام يورانيوم ٢٣٥ مثري بشكل كبير. ولتحقيق توقعات فريتش فقد شكلت الحكومة

البريطانية لجنة لهذا الغرض ونشر إثر ذلك تقريراً في يولييه ١٩٤١م أكد إمكانية صنع القنبلة النووية. وقد تنبأ التقرير أيضاً بإمكانية استخدام الطاقة النووية لإنتاج الكهرباء ولإنتاج العنصر الإشعاعي البلوتونيوم ٢٣٩ من اليورانيوم ٢٣٨.

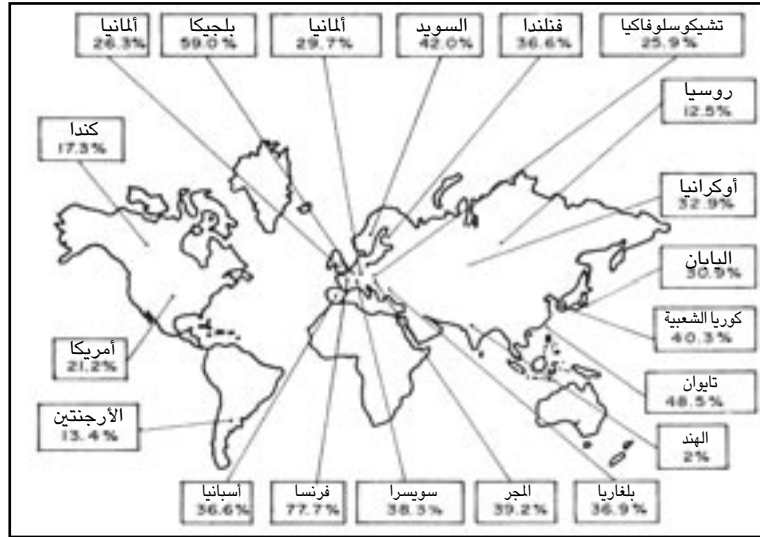
إن الجهد الكبير والأهم الذي بذل في الولايات المتحدة هو الذي شجع على دراسة ظاهرة الانشطار النووي، حيث كان فيرمي وفريقه يخططون لبناء منشأة لتمثيل تفاعل الانشطار التسلسلي عملياً. وقرر هؤلاء استخدام الجرافيت كمهدئ وأكسيد اليورانيوم كوقود، حيث أن فلز اليورانيوم عالي النقاوة لم يكن متاحاً في المراحل المبكرة. وتم لهذا الغرض إنشاء حوالي ٣٠ مجمعاً صغيراً للحصول حينئذ على المعلومات الضرورية اللازمة لبناء المفاعل. وقد صنع البناء النهائي من قوالب جرافيت تم إعدادها بثقوب مناسبة لاحتواء مكورات أكسيد اليورانيوم ذات القطر ٣,٢٥ بوصة. وقد حضرت عدة أطنان من قوالب فلز اليورانيوم عالي النقاوة كي يتم بناء المفاعل. وللتحكم في التفاعل الإشعاعي التسلسلي فقد تم استخدام الكادميوم. وبواسطة هذا المفاعل، أمكن تحقيق التفاعل الإشعاعي التسلسلي المستمر في ٢ ديسمبر ١٩٤٢م. كانت قدرة المفاعل حوالي ٢٠٠ واط، وعلى ذلك لم يكن هناك ضرورة للتبريد. وأول تطبيق للتفاعل الإشعاعي التسلسلي الدائم كان إنتاج البلوتونيوم. وأول مفاعل بني لهذا الغرض كان في معمل أوكرج الوطني بأمريكا في شهر نوفمبر ١٩٤٣م، حيث استخدم فيه ٣٥ طن من فلز اليورانيوم كوقود وتم إنتاج ٣,٨ ميغاواط حرارة. وتم تبريد المفاعل بواسطة الهواء. وأمكن إنتاج حوالي ٤ جرام من البلوتونيوم يومياً بواسطة هذا المفاعل. تلا ذلك بناء عدد من المفاعلات لإنتاج البلوتونيوم في مواقع مختلفة في الولايات المتحدة الأمريكية والمملكة المتحدة وفرنسا وكذلك في الاتحاد السوفيتي (سابقاً).

وعقب الحرب العالمية الثانية اتجهت تقنية المفاعلات إلى تطوير مفاعلات تستخدم لتطبيقات أخرى. ففي عام ١٩٥٣ م دشنت الولايات المتحدة الأمريكية غواصة تعمل بالطاقة النووية سميت نوتلس "Nautilus". وفي موسكو، بدأ تشغيل أول مفاعل لإنتاج الكهرباء وكان ذلك في يونيو ١٩٥٤ م. كان ذلك المفاعل بقدرة ٥ ميجاوات كهرباء، وقد استخدم فيه أكسيد اليورانيوم كوقود، والجرافيت كمهدئ، والماء كمبرد. وأول مفاعل أمكن من خلاله تأمين الكهرباء للتطبيقات التجارية هو المفاعل الذي بني في المملكة المتحدة في أغسطس ١٩٥٦ م. وكان هذا المفاعل بقدرة ٥٠ ميجا واط كهرباء، واستخدم فيه فلز اليورانيوم كوقود، والجرافيت كمهدئ، وثاني أكسيد الكربون كمبرد. وعلى كل حال، فإن الهدف الرئيس من ذلك المفاعل كان إنتاج البلوتونيوم اللازم للبرامج العسكرية. أما أول مفاعل خصص للتطبيقات المدنية المجردة فقد بني في الولايات المتحدة الأمريكية في عام ١٩٥٧ م في شبنج بورت (Shipping Port). وكان ذلك المفاعل بقدرة ٢٠ ميجا واط كهرباء، واستخدم فيه أكسيد اليورانيوم كوقود، والماء الخفيف كمهدئ وكذلك كمبرد. أما استخدام المفاعلات النووية في تسيير السفن فقد بدأه الاتحاد السوفيتي (سابقاً) عام ١٩٥٩ م بتدشين محطة الجليد لينين (Lenin) التي كانت تعمل بثلاثة مفاعلات بقدرة ٩٠ ميجا واط كهرباء لكل منها. وفي الوقت الحاضر، فإنه من بين العدد الكبير من المفاعلات التي تعمل في شتى أنحاء العالم يستخدم ٦٠٠ مفاعل لتسيير السفن والغواصات، وحوالي ٣٥٠ مفاعلاً في الأبحاث وفي إنتاج النظائر المشعة. ويعمل حالياً أكثر من ٤٠٠ مفاعلاً في عدد من الدول لإنتاج حوالي ١٨٪ من كهرباء العالم جدول (١-٢)^(١). ويوضح شكل (٢-٦) النسبة المئوية للكهرباء المنتجة بواسطة مفاعلات القوى النووية في بعض دول العالم. ويعطي الجدول (٢-٢) كثافة مفاعلات القوى النووية بدلالة MWe/km^2 لعدد من الدول. يتضح من الجدول أنه في كثير من الدول تصل الكثافة إلى ٠,٠٩ ميجا واط كهرباء أو أكثر لكل كيلومتر مربع من الأرض. وفي الهند، فإن هذا المستوى من الكثافة سوف يتحقق ببناء السعة النووية التي تصل إلى ٣٠٠ ٠٠٠ ميجا واط كهرباء.

(١) للحصول على معلومات حديثة عن المفاعلات النووية حول العالم يرجى الرجوع إلى "Nuclear Power Reactors: in the World", IAEA series No. 2, 2004, ISBN 92-0-108204-5

الدولة	نوع المفاعل	القدرة الكهربائية (ميغاوات كهرباء)	نسبة الكهرباء من الطاقة النووية (%)
بلجيكا	7 PWR	5527	58.9
بلغاريا	6 PWR	3538	36.9
كندا	22 PHWR	15755	17.3
الصين	2 PWR	1194	0.3
فنلندا	2 PWR, 2 BWR	2310	32.9
فرنسا	54 PWR, 1 GCR, 2 FBR	59033	77.7
ألمانيا	14 PWR, 7 BWR	22657	29.7
المجر	4 PWR	1729	43.3
الهند	2 BWR, 7 PHWR	1593	1.9
اليابان	21 PWR, 25 BWR, 1GCR, 1 HWLWR	38029	30.9
جمهورية كوريا	8 PWR, 1PHWR	7220	40.3
لثوانيا	2 LWGR	2370	87.2
روسيا	13 PWR, 15 LWGR, 1 FBR	19843	12.5
أسبانيا	7 PWR, 2 BWR	7105	36.0
السويد	2 PWR, 9 BWR	10002	42.0
سويسرا	3 PWR, 2 BWR	2985	37.9
بريطانيا	20 GCR, 14 ACR, 1 FBR	11909	26.3
أوكرانيا	12 PWR, 3 LWGR	12679	32.9
أمريكا	72 PWR, 37 BWR	98784	21.2
المجموع بما فيه الدول الأخرى	243 PWR, 92 BWR, 22 GCR, 14 AGR, 33 PHWR, 20 LWGR, 5 FBR, 1 OTHER.	337820	18

جدول (١-٢): المفاعلات النووية في العالم وقدراتها.



شكل (٢-٦): مساهمة الطاقة النووية في إنتاج الكهرباء في عدد من الدول (١٩٨٧م).

الدولة	المساحة كم ^٢	ميغا واط كهرباء	ميغا واط كهرباء لكل كلم ^٢
بلجيكا	30,507	5,527	0.181
كندا	9,976,185	15,755	0.0015
فرنسا	551,607	59,033	0.107
ألمانيا	248,414	22,657	0.091
اليابان	369,642	38,029	0.102
كوريا الجنوبية	60,800	7,220	0.119
تايوان	22,200	4,890	0.220
بريطانيا	150,700	11,909	0.079
أمريكا	9,363,399	98,784	0.010
الهند (٢٠٠٠)	3,183,666	5,000	0.0015
الهند (مدى طويل)	3,183,666	300,000	0.094

جدول (٢-٢): الطاقة النووية في عدد من الدول.

مفاعلات القوى Power Reactors

يمكن تصنيف المفاعلات حسب استخدامها وحسب طاقة النيوترونات، وكذلك بناءً على نظام التبريد والتهدئة المستخدم. والمفاعلات التي تستخدم للدراسات والبحوث النيوترونية أو لإنتاج النظائر تسمى مفاعلات الأبحاث. هذا النوع من المفاعلات يكون بسيطاً في تصميمه مقارنة بمفاعلات القوى التي تستخدم لإنتاج الكهرباء. وعند استخدام مهدئ لتهدئة النيوترونات للسرعات الحرارية، فإن المفاعلات هنا تسمى المفاعلات الحرارية. أما عندما يستخدم تركيز ملاتم من النظير الإنشطاري في وقود المفاعل دون الحاجة للتهدئة، فإن المفاعلات هنا تسمى المفاعلات السريعة نظراً لحدوث الانشطار بالنيوترونات السريعة.

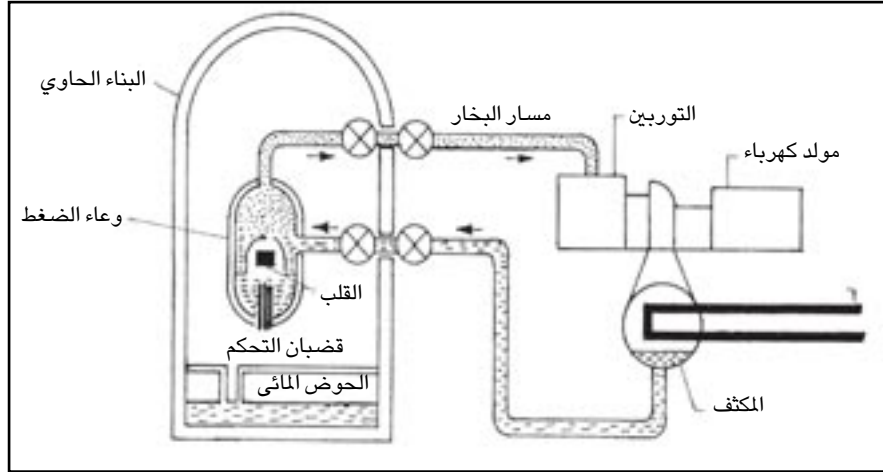
تصنف مفاعلات القوى غالباً بناءً على نوع المبرد المستخدم. وفيما يلي بعض الأنماط البارزة من المفاعلات التي تعمل حالياً في العالم لإنتاج الكهرباء مع بيان قدراتها الكهربائية الصافية:

- ١- مفاعلات الماء المغلي (BWR) ٧٥٥٥٥ ميجاوات كهرباء .
- ٢- مفاعلات الماء المضغوط (PWR) ٢١٣٧٣٣ ميجاوات كهرباء.
- ٣- مفاعلات الماء الثقيل المضغوط (PHWR) ١٨٧٣٧ ميجاوات كهرباء .
- ٤- مفاعلات الماء الخفيف المهدأة بالجرافيت (LWGR) ١٤٩٦٥ ميجاوات كهرباء .
- ٥- المفاعلات المبردة بالغاز (GCR) ٤٠٥٩ ميجاوات كهرباء .
- ٦- المفاعلات المتطورة المبردة بالغاز (AGR) ٨٣١٥ ميجاوات كهرباء .
- ٧- المفاعلات مرتفعة الحرارة المبردة بالغاز (HTGR) - غير موجودة حالياً.
- ٨- المفاعلات الولودة السريعة المبردة بالفلز السائل (LMFBR) ٢٢٩٧ ميجاوات كهرباء .

و تتطلب المفاعلات التي تستخدم الماء الخفيف كمهدئ أو مبرد إثراء اليورانيوم، وذلك مثل مفاعلات الماء المغلي ومفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء الخفيف المهدأ بالجرافيت (BWR و PWR و LWGR). وبالطريقة نفسها، إذا كانت مادة التغليف المستخدمة تمتص النيوترونات، فإن إثراء اليورانيوم يصبح لازماً. كما في حالة المفاعلات المتطورة المبردة بالغاز (AGR).

ويستخدم أكسيد اليورانيوم كوقود في مفاعلات الماء المغلي بحيث تكون نسبة اليورانيوم ٢٣٥ من ١,٥ إلى ٣ ٪، وتستخدم سبيكة الزركونيوم لغرض التغليف ويحاط المفاعل بوعاء من الفولاذ القوي غير القابل للصدأ. كما أن الماء المناسب خلال المفاعل يستخدم كمبرد وفي الوقت نفسه كمهدئ ويكون مضغوطاً حتى ٧٠ ضغط جوي، وذلك ليحصل الغليان عند ٢٨٥ درجة مئوية. ويتم تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية بفعالية جيدة بواسطة العنفات. وتصل القدرة الإجمالية لمثل هذا النوع من المفاعلات في العالم إلى حوالي ٧٥٥٥٥ ميغا واط كهرباء. ويبين شكل (٢-٧) مخططاً توضيحياً لمفاعلات الماء المغلي. وجدير بالذكر أن مفاعلات محطة قوى تارابور النووية في الهند هي من هذا النوع.

وتتشابه كل من مفاعلات الماء المضغوط مع مفاعلات الماء المغلي من حيث الوقود وكذلك من حيث التغليف، ولكن الضغط داخل مفاعل الماء المضغوط يكون عند حوالي ١٤٥ ضغطاً جويًا، بحيث لا يغلي الماء حتى مع الوصول إلى حرارة ٣١٠ درجة مئوية. وعلى ذلك، فإن وعاء المفاعل في مفاعلات الماء المضغوط يجب أن يكون أمتن منه في مفاعلات الماء المغلي. ويتقل هذا الماء عالي الحرارة إلى المبادل الحراري وذلك لإنتاج البخار ومن ثم يعاد إلى المفاعل. ويستخدم البخار الناتج في المبادل الحراري لإنتاج الكهرباء. ومفاعلات الماء المضغوط هي الأكثر شيوعاً في العالم، وتصل القدرة الإجمالية الحالية لهذه المفاعلات في العالم إلى ٢١٣٧٣٣ ميغا واط كهرباء.



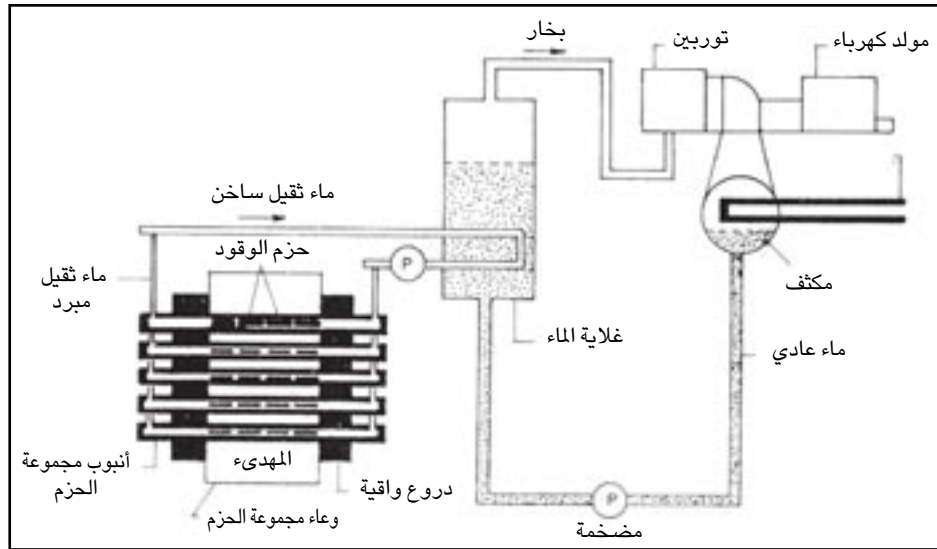
شكل (٢-٧): مفاعل الماء المغلي (BWR).

يقوم مفاعل الماء الثقيل المضغوط على استخدام وقود أكسيد اليورانيوم الطبيعي مع سبيكة الزركونيوم كمادة تغليف. وخلاف النوعين المذكورين في الفقرات السابقة، فإن هذا النوع لا يستخدم فيه وعاء ضغط عال لاحتواء مكونات لب المفاعل. بل بدلاً من ذلك، فإن الوقود يتم احتوائه في عدد من أنابيب الضغط التي يتم تركيبها في وعاء كبير يدعى كالاندريا (Calandria). ويتم ملء الوعاء بالماء الثقيل المستخدم للتهديئة ويحفظ بارداً (أقل من ٨٥ درجة مئوية)، وتركب قضبان التحكم في الوعاء. ويأخذ الماء الثقيل المستخدم لتبريد الوقود دورته خلال أنابيب الضغط وذلك تحت ضغط ٨٥ ضغط جوي وعند درجة حرارة حوالي ٣٠٠ درجة مئوية. ويبين الشكل (٢-٨) صورة تخطيطية لمثل هذا المفاعل. وتبلغ القدرة الإجمالية لهذا النوع من المفاعلات في العالم ١٨٧٣٩ ميجا واط كهرباء.

أول مفاعل استخدم لإنتاج الكهرباء كان من النوع المبرد بالماء الخفيف والمهدأ بالجرافيت. وقد كان موجوداً في الاتحاد السوفيتي (سابقاً). وهذا المفاعل ذو أنبوب ضغط كمفاعل الماء الثقيل المضغوط ولكن الأنبوب هنا رأسي. وقد

استخدم في ذلك المفاعل أكسيد اليورانيوم كوقود بنسبة إثراء بين ١,٥ و ٢٪، واستخدم الزركونيوم كمادة تغليف. ويتكون المهدئ من قوالب مستطيلة مصفوفة من الجرافيت، في حين يستخدم الماء المناسب خلال أنابيب الضغط كمبرد للمفاعل. يستخدم هذا المبدأ فقط في الاتحاد السوفيتي (سابقاً). وتصل القدرة الإجمالية المشغلة حالياً لهذا النوع من المفاعلات إلى حوالي ١٤٩٦٥ ميجا واط كهرباء. ولقد كان مفاعل حادث تشيرنوبل الشهير من هذا النوع. وهذا المفاعل، رغم تشغيله بنجاح كبير في الاتحاد السوفيتي (سابقاً) ولسنوات عديدة، فقد كان ذا مواصفات غير آمنة ولم يكن ليرخص له بالعمل في الهند أو في عدد من الدول الأخرى.

وقد تم تطوير المفاعلات المبردة بالغاز في المملكة المتحدة وفي فرنسا على ضوء خبرتهما في مفاعلات إنتاج البلوتونيوم. ويستخدم في هذه الفكرة فلز اليورانيوم الطبيعي المغلف بالماجنوكس (سبيكة المغنيسيوم) كوقود للمفاعل. وعلى ذلك فإن هذه المفاعلات تسمى أحياناً مفاعلات الماجنوكس. وللتهدئة في



شكل (٢-٨): مفاعل الماء الثقيل المضغوط (PHWR).

هذه المفاعلات يستخدم الجرافيت، والتبريد يستخدم غاز ثاني أكسيد الكربون. وتصل درجة حرارة المبرد في المتوسط إلى ٤٠٠ درجة مئوية، ويصل الضغط إلى حوالي ٢٠ ضغط جوي. وتصل القدرة الإجمالية الحالية لهذا النوع من المفاعلات في العالم إلى ٤٠٥٩ ميغا واط كهرباء.

وقد طورت المملكة المتحدة المفاعل المتقدم المبرد بالغاز بالاستفادة من فكرة المفاعلات المبردة بالغاز. وفي هذا المفاعل يستخدم الجرافيت كمهدئ وغاز ثاني أكسيد الكربون كمبرد. ويكون الوقود على شكل حبيبات من ثاني أكسيد اليورانيوم المحتوية يورانيوم ٢٣٥ بنسبة من ١,٢ إلى ٢,٣٪ موضوعة في أنابيب من الفولاذ غير القابل للصدأ. وتصل درجة الحرارة عند مخرج غاز التبريد للمفاعل إلى ٦٥٠ درجة مئوية، ويصل الضغط إلى حوالي ٤٠ ضغط جوي. وتستخدم هذه المفاعلات فقط في المملكة المتحدة وتصل قدرتها الإجمالية إلى ٨٣١٥ ميغا واط كهرباء تقريباً.

يختلف مفاعل الحرارة العالية المبرد بالغاز في فكرته عن المفاعلات الأخرى في أنه لا يستخدم التغليف الفلزي المعتاد للوقود. فالوقود يكون على شكل كريات صغيرة جداً (بقطر ٠,٢ مم) من $(U, Th) C_2$ أو $(U, Th) O_2$ التي تكون مغطاة بطبقات من الجرافيت وكربيد السيليكون كنوع من التغليف. وتخلط هذه الكريات مع الكربون وتدرج في وقود المفاعل بالشكل المرغوب فيه. ويستعمل الجرافيت والهيليوم كمهدئ وكمبرد على الترتيب. وتكون درجة إثراء اليورانيوم في حدود ٢٠ إلى ٩٠٪، وتصل درجة الحرارة عند مخرج الهيليوم إلى ٧٤٠ درجة مئوية، ويصل الضغط إلى ٥٠ ضغط جوي. وتم تشغيل مفاعلين فقط من هذا النوع في العالم: الأول في الولايات المتحدة الأمريكية بقدرة ٣٣٠ ميغا واط كهرباء، والثاني في ألمانيا بقدرة ٣٠٠ ميغا واط كهرباء، وكلاهما من مفاعلات القوى.

وتستند المفاعلات الولودة السريعة المبردة بالفلز المنصهر إلى استخدام النيوترونات السريعة، وعلى ذلك فلا ضرورة هنا لوجود مهدئ. واستخدام النيوترونات السريعة يسمح بفعالية أكبر لتحويل اليورانيوم ٢٣٨ إلى بلوتونيوم ٢٣٩. والمفاعلات التي تكون فيها كمية المواد الإنشطارية الناتجة أكبر من كمية المواد الانشطارية المستهلكة تسمى المفاعلات الولودة. وحيث أنه لا يستخدم مهدئ في المفاعل، فإن تركيز المواد الانشطارية يجب أن يكون عالياً. وحالياً، يستخدم خليط من أكسيدي اليورانيوم والبلوتونيوم كوقود بحيث يحوي ٢٥٪ من أكسيد البلوتونيوم. يغلف هذا الوقود بأنابيب من الفولاذ غير القابل للصدأ ويتم تبريده بفلز الصوديوم المنصهر. وتصل درجة حرارة المبرد (الصوديوم) إلى ٦٢٠ درجة مئوية، في حين يصل ضغطه إلى ٣ ضغط جوي. ويحاط مركز المفاعل، الذي يسمى لب أو قلب المفاعل، بعناصر تحوي غطاءً من ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) وذلك للحصول على البلوتونيوم بشكل فعال. ويعرض الشكل (٢-٩) مخططاً لهذا المفاعل.

هناك ثلاث دول تملك هذا النوع من مفاعلات القوى وهي: فرنسا (بقدرات ٢٥٠ و ١٢٠٠ ميجا واط كهرباء) والمملكة المتحدة (بقدرية ٢٥٠ ميجا واط كهرباء) والاتحاد السوفيتي (سابقاً) (٣٠٠ و ٦٠٠ ميجا واط كهرباء). وما زالت الأبحاث في هذا المجال قائمة في كل من الولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا واليابان والهند.

خواص الأمان اللازمة للمفاعلات Inherent Safety Features of Reactors

يجب أن تعمل قضبان التحكم في مفاعلات القوى بشكل مستمر، وذلك لاستمرار تولّد الطاقة حسب الطلب على الكهرباء أو لتعويض استنزاف النظائر الانشطارية. ولكي تتم زيادة قدرة المفاعل فإن قضبان التحكم تسحب بشكل يسير من المفاعل. وحيث أن قدرة المفاعل تنمو بشكل سريع جداً، فإن قضبان التحكم يلزم أن تكون سريعة الاستجابة لضمان التشغيل الآمن للمفاعل. إضافة

لذلك، فإن المفاعل يصمم بشكل ملائم بحيث أن أية زيادة مفاجئة في القدرة يجب أن تواجه بخواص مكافئة في أنظمة الوقود و المهدئ والمبرد. وعلى ذلك فإن جميع المفاعلات تصمم بحيث تتمتع بمعامل قدرة حرارية سالبة^(١). وهذا يضمن ألا تفقد السيطرة على التفاعل النووي في أي طور من أطوار التشغيل ويضمن كذلك حفظ دوام شروط الأمان.

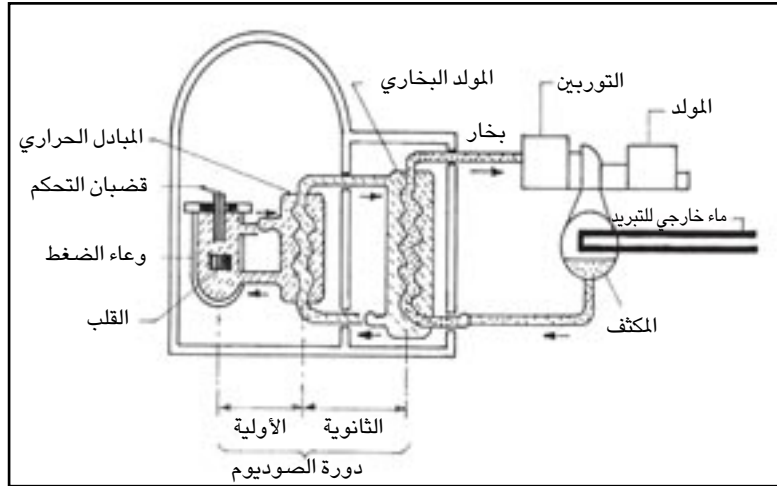
وأكثر ما يشغل مصممي المفاعلات هو السيطرة على نواتج الانشطار وضمان عدم انتشارها في البيئة المحيطة، وخفض مستوى المنبعث منها للحد الأدنى. وهناك عدد من الحواجز التي تمنع وصول نواتج الانشطار إلى البيئة. أول هذه الحواجز هي مصفوفة الوقود نفسها. والحاجز الثاني هو مادة تغليف الوقود. أما الحاجز الثالث فتمثله الدائرة المغلقة لنظام التبريد والتي تحمل معها عادة نواتج الانشطار النشطة إشعاعياً إلى حوض الماء المستخدم لتبريد الوقود. ويتم توفير الحاجز الرابع بواسطة وعاء أو أنبوب الضغط.

وعند خروج النواتج ذات النشاط الإشعاعي من نطاق وعاء الضغط أو أنابيب الضغط إلى مبنى المفاعل فإنها لا تستطيع النفاذ إلى الخارج بسبب أن مبنى المفاعل يكون مصمماً بطريقة محكمة ضد أي تسرب للغازات. ولا يسمح إلا بالتسرب عن طريق منافذ خاضعة للسيطرة وذات ترشيح ملائم. ويكون مبنى المفاعل نفسه محاطاً بمنطقة معزولة تمتد إلى ١,٦ كم، ومنطقة حماية بنصف قطر ٥ كم وذلك لتلافي تعرض السكان للإشعاع المنطلق عند أية حادثة تحدث، وهذا الأمر يندر جداً حدوثه. وتوفر منطقة الكيلومترات الخمسة خفضاً في مستوى الإشعاع في حالة انطلاقه.

وعلى ذلك، فإن المفاعل النووي يكون ذا تصميم ملائم من حيث السلامة يضمن عدم تعرض الجمهور للإشعاع حتى في حالة الحوادث التي يستبعد

(١) معامل القدرة الحرارية السالبة للقدرة يعني أنه عند زيادة درجة حرارة قلب المفاعل تنخفض على الفور قدرته تلقائياً حتى تعود الحرارة لمعدلها.

وقوعها. وما يتعرض له الإنسان العادي من إشعاع نتيجة التشغيل العادي للمفاعل النووي ما هو إلا جزء ضئيل جداً بالمقارنة بما يتعرض له خلال حياته اليومية من إشعاعات بيئية طبيعية. ففي الساعة الواحدة يتفكك في رئتي الإنسان ما مجموعه ٣٠ ألف ذرة من ذرات الراديوم والبولونيوم والبزموت والرصاص. كما يخترق أجسادنا ٠,٤ مليون من الجسيمات الثانوية من الأشعة الكونية، ويتفكك فيها ما يقرب من ١٥ مليون من ذرات البوتاسيوم ^{40}K ، التي هي جزء من محتوى البوتاسيوم الكلي في أجسامنا. إلى جانب ذلك، فإننا نستقبل الإشعاع بشكل مستمر من النظائر الأرضية الطبيعية، ومن الفحوص الطبية وغيرها، والتي لم يعرف أن لها أية آثار ضارة. ومن الخبرة المكتسبة في محطات القوى النووية في تارابور وكوتا ومدراس، وجد أن مساهمة تلك المحطات في رفع الخلفية الإشعاعية في المناطق المجاورة لا يتعدى واحد بالمائة من الخلفية الإشعاعية الطبيعية. وهذا لا يولى اعتباراً لأن الخلفية الإشعاعية الطبيعية نفسها يمكن أن تزيد إلى الضعف من مكان إلى آخر.

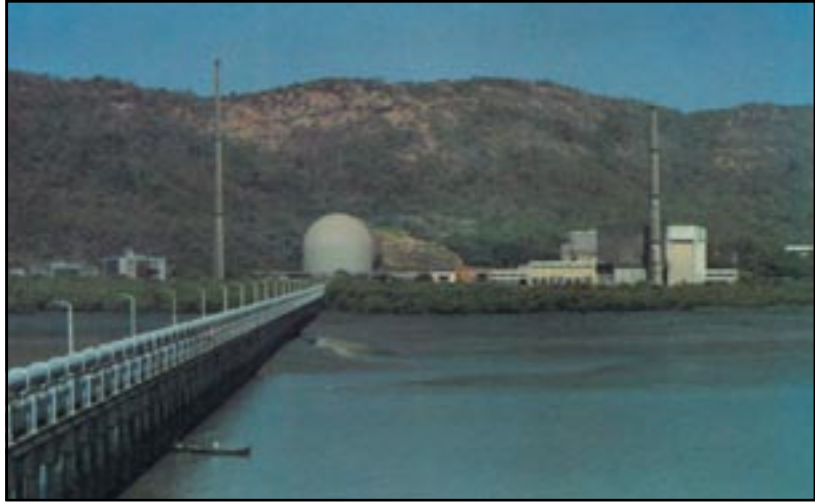


شكل (٢-٩): مفاعل ولود سريع مبرد بالفلز المنصهر (LMFBR).

**لمحات مصورة لبعض المواد
والإمكانات النووية المتوفرة**



مفاعل أبسارا



منظر لمفاعلي كيروس و دروفا



أمونيوم ثنائي اليورانيوم حديث الاعداد



مغنسيوم ثنائي اليورانيوم
(الكعكة الصفراء)



قالب فلز اليورانيوم



مسحوق أكسيد البلوتونيوم



فلز البلوتونيوم



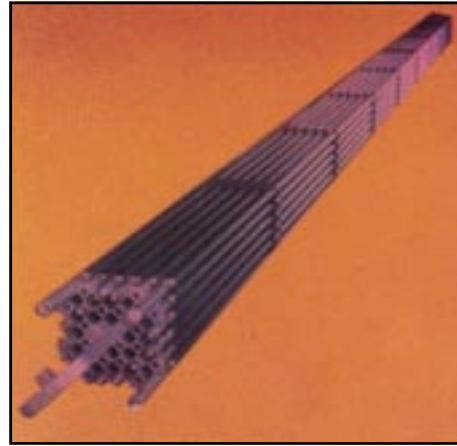
مختبر كيمياء إشعاعية وتظهر الصورة
صناديق القفزات



حزمة الوقود لمفاعلات الماء الثقيل
المضغوط



حببيبات أكسيد اليورانيوم



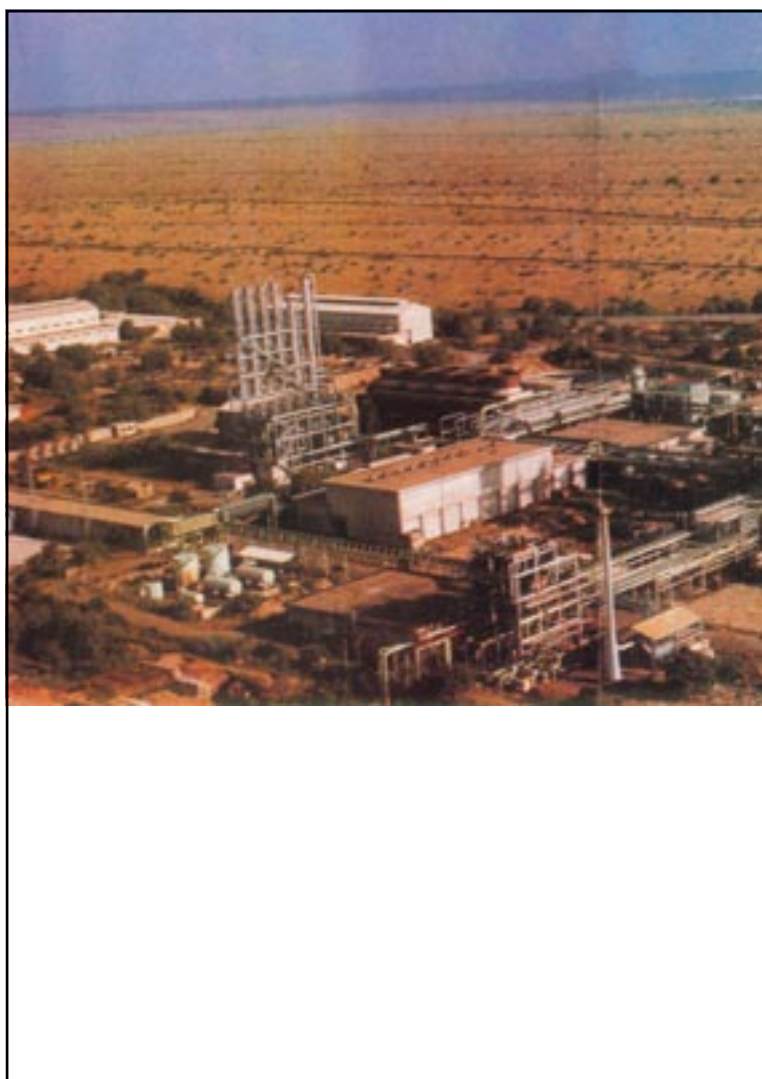
حزمة الوقود لمفاعلات تارابور



الزركونيوم الأسفنجي



أنابيب سبيكة الزركونيوم



محطة الماء الثقيل في كوتا ، راجستان



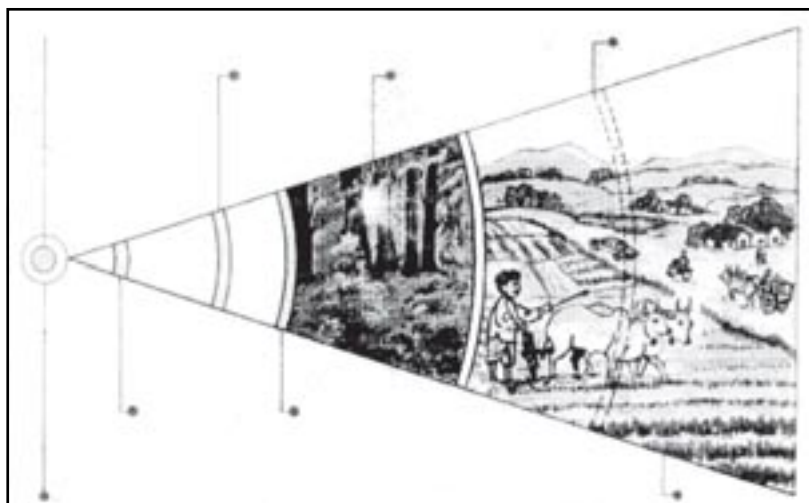
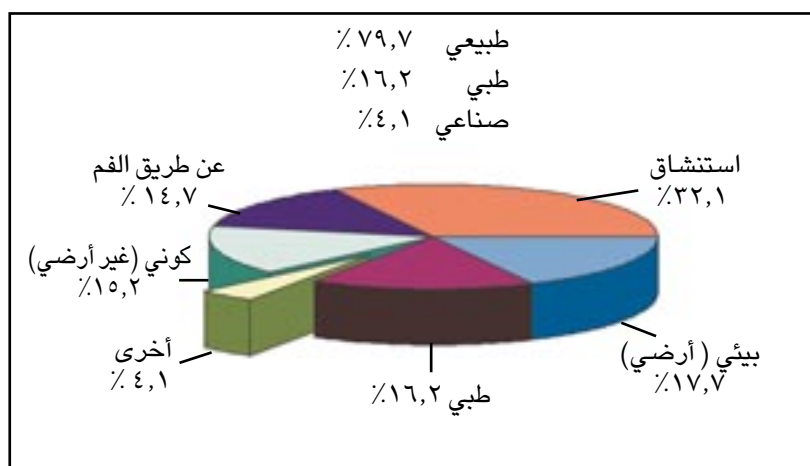
محطة مدراس للطاقة الذرية



محطة كاكرا بار للطاقة الذرية



منظر مخطط لمفاعل الماء الثقيل المتقدم



مصادر التعرض الإشعاعي الكلي لسكان الهند



مسبار محمي للتنقيب عن اليورانيوم في
منجم بدال



محطة البريليوم في وادي ، نيو مومباي

الفصل الثالث

اليورانيوم URANIUM

مقدمة Introduction

اليورانيوم هو أثقل العناصر الموجودة في الطبيعة وهو أحد أكبر مصادر الطاقة للإنسانية. واليورانيوم الطبيعي له ثلاثة نظائر جميعها تتفكك بانبعاث جسيمات ألفا (α -emission) يشكل اليورانيوم ٢٣٨ (^{238}U) ذو عمر النصف $4,5 \times 10^9$ سنة ما نسبته ٩٩,٢٨٪ من اليورانيوم الطبيعي. ويشكل اليورانيوم - ٢٣٥ (^{235}U) ذو عمر النصف $7,1 \times 10^8$ سنة ما نسبته ٠,٧١٥٪ من اليورانيوم الطبيعي. أما اليورانيوم ٢٣٤ (^{234}U) ذو عمر النصف $2,35 \times 10^5$ سنة الناتج من تفكك اليورانيوم ٢٣٨ فيشكل نسبة بسيطة هي ٠,٠٠٥٪ من اليورانيوم الطبيعي. ويوضح الشكل (١-٤) في الفصل الأول نواتج تفكك اليورانيوم ٢٣٨ وعمر النصف لكل منها، والشكل (٣-١) يعطي معلومات مماثلة عن اليورانيوم ٢٣٥. واليورانيوم ٢٣٥ هو المصدر الرئيس للطاقة النووية في معظم المفاعلات الحالية، أما اليورانيوم ٢٣٨ فتتمثل أهميته في إمكانية تحويله إلى البلوتونيوم ٢٣٩. وبسبب اختلاف عمر النصف للنظيرين الرئيسين لليورانيوم فإن الوفرة النسبية لكل منهما تتغير مع الزمن. وقد قدر أنه عند تكون الأرض منذ عدة بلايين من السنين كان اليورانيوم ٢٣٥ يشكل ما يقرب من ١٤٪ من اليورانيوم الطبيعي. ومع مرور الزمن حصل انخفاض في وفرة اليورانيوم ٢٣٥ إلى المستوى الحالي (٠,٧١٥٪). وهذه النسبة كافية لاستخدامه في المفاعلات النووية، وسوف يكون التغير في الوفرة النسبية لليورانيوم ٢٣٥ في آلاف السنين القادمة ضئيل جدا.

أكتشف اليورانيوم بواسطة مارتين كلابروث (Martin Heinrich Klaproth) عام ١٧٨٩م. وخلال مائة وسبع سنوات من اكتشافه اقتصر استخدامه على إنتاج الزجاج الملون. حيث أمكن إنتاج الزجاج ذي النوعية الجيدة وذي اللون الأصفر أو البني أو الأخضر باستخدام بعض مركبات اليورانيوم.

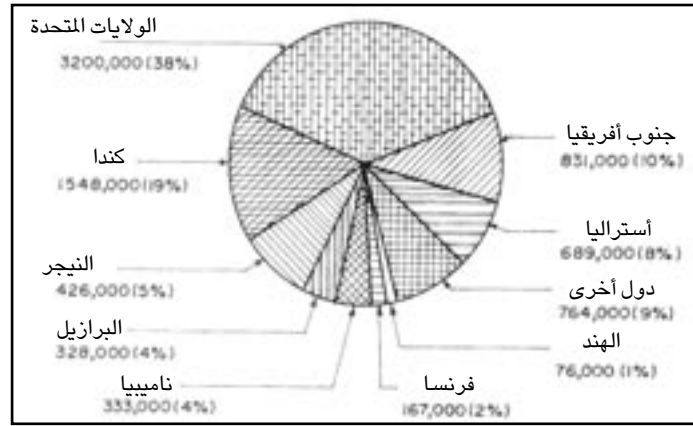
92 U	91 Pa	90 Th	89 Ac	88 Ra	87 Fr	86 Rn	85 At	84 Po	83 Bi	82 Pb	81 Tl
^{238}U $4.47 \times 10^9 \text{ a}$		^{234}Th 24.1 d									
	^{234}Pa $1.17 \times 10^5 \text{ a}$	^{234}Th 24.1 d	^{234}Ac 2.8 d								
		^{234}Th 24.1 d	^{234}Pa $1.17 \times 10^5 \text{ a}$	^{234}Ac 2.8 d	^{234}Ra 3.66 a	^{234}Rn 3.8 d	^{234}At $1.7 \times 10^{-10} \text{ s}$	^{234}Po $1.14 \times 10^{-12} \text{ s}$	^{234}Bi 4.77 m	^{234}Pb 26.8 m	
									^{234}Bi 4.77 m	^{234}Pb 26.8 m	^{234}Tl 4.77 m
										^{234}Pb STABLE	

شكل (٣-١): التفكك الإشعاعي لليورانيوم ٢٣٥ ونواتجه.

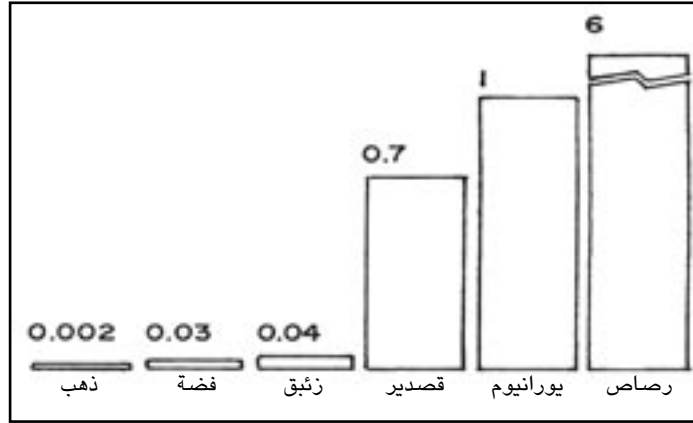
إن اكتشاف النشاط الإشعاعي بواسطة بكريل عام ١٨٩٦ م الذي أدى إلى اكتشاف الانشطار النووي عام ١٩٣٩ م قد غيّر الصورة بشكل تام. ففي المراحل الأولى لتصميم المفاعل النووي في الولايات المتحدة الأمريكية لم يكن هناك مصدر محلي لليورانيوم. لذلك، كان اليورانيوم يستورد من الكونغو الأفريقية (المستعمرة حينئذ من بلجيكا). وبعد أن عرف العالم سر الطاقة الذرية بدأ عدد كبير من الدول بـ برامج مكثفة لاكتشاف اليورانيوم. ويوضح شكل (٣-٢) وضع مصادر اليورانيوم في العالم. واليورانيوم من العناصر الموجودة بنسبة كبيرة في القشرة الأرضية حيث أن وفرة في الأرض أكبر من وفرة الذهب والفضة والزنك. وتقترب وفرة اليورانيوم في القشرة الأرضية من وفرة الرصاص والقصدير والكوبلت وغيرها. ويوضح شكل (٣-٣) الوفرة النسبية لليورانيوم. ويوجد اليورانيوم في التركيبات الصخرية بنسبة أكبر من وجوده في الماء. فصخور الجرانيت والفحم تحوي من ٣ إلى ٤ أجزاء من المليون من اليورانيوم، في حين تحتوي مياه المحيط على جزئين من المليون فقط. وكما هي الحال في العناصر الفلزية الأخرى فاليورانيوم لا يوجد في الطبيعة بشكل حر وإنما يوجد

على شكل مركبات من الأكسجين والعناصر الأخرى. وأكاسيد معادن اليورانيوم تحوي خليطا من ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) وثالث أكسيد اليورانيوم (UO_3)، وهذه تتضمن معدن البتشلند Pitchblende واليورانايت Uranite، أما معدن الكوفنات Coffinite فهو أحد معادن السيلكا واليورانيوم $(U(SiO_4)_{1-x}(OH)_4)_x$.

أما معدن الكارنوتايت Carnotite فهو فاندات البوتاسيوم يورانيوم Potassium - uranium vanadate $(K_2O \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 2H_2O)$. ومعظم المعادن المحتوية على اليورانيوم يكون محتوى اليورانيوم فيها من ١ إلى ١٠٪. وقد وجدت بعض الترسبات من المعادن التي تحوي مانسبته ٤ إلى ٢٥٪ من اليورانيوم.

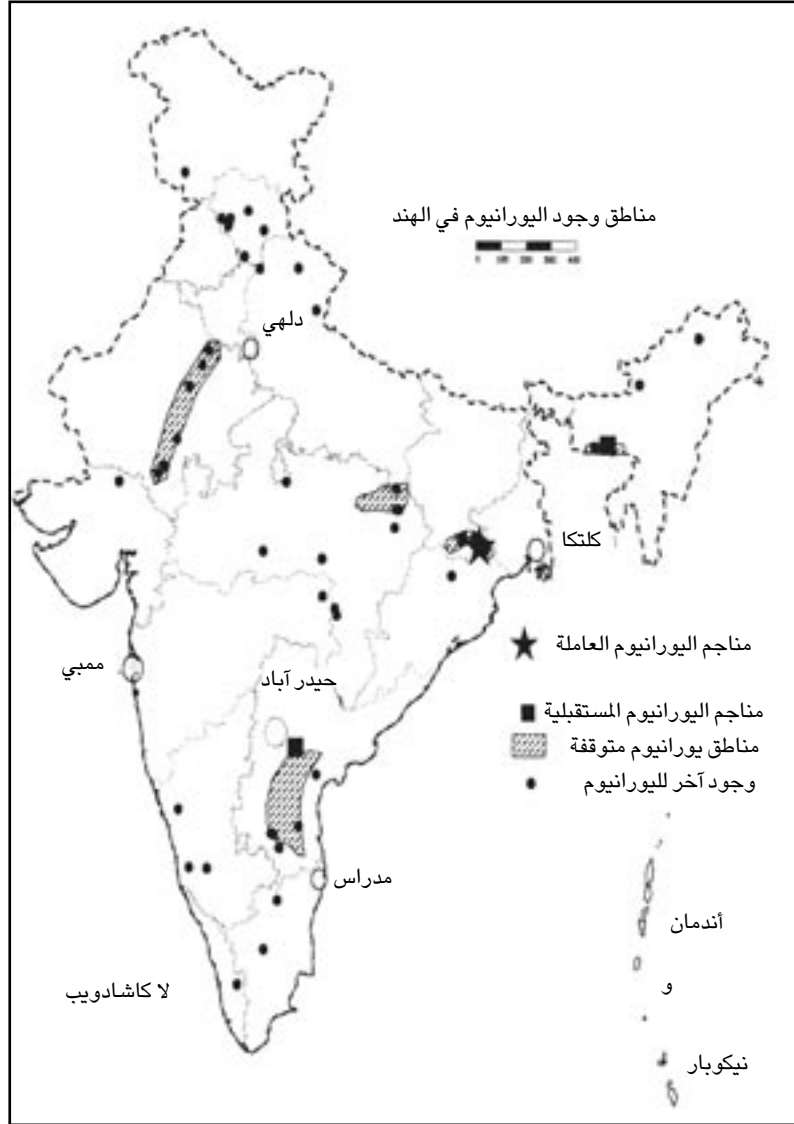


شكل (٣-٢): التوزيع الجغرافي لليورانيوم (بالطن) في الدول عدا روسيا وغرب أوروبا.



شكل (٣-٣): الوفرة النسبية لليورانيوم في الأرض.

يوضح الشكل (٣-٤) المناطق التي تحوي معادن اليورانيوم في الهند. وقد عرفت حديثاً الترسبات الرئيسية لليورانيوم في منطقة سينغبوم Singhbhum في ولاية بيهار . ولا تزال جادجودا Jaduguda الموقع الرئيس لاستخلاص اليورانيوم. وتشمل المناطق الأخرى الخاضعة لعملية الاستكشاف كل من بهاتن Bhatin وناروابهار Narwapahar وتيورا مديه Turamdih. وإلى جانب ترسبات اليورانيوم المكتشف في بيهار، فقد تم التعرف على ترسبات أخرى في بودال وجاجوال في منطقة مدهايارادش Madhaya pradesh وفي أربيل (Arbail) في منطقة كارناتاكا وفي أسوتاتا في منطقة هيماشال برادش وفي دومياسيت وتيما Taymai وجوماغات Gomaghat في منطقة ميجهاليا وفي كودابا Cuddapah في أندهارا برادش Andhara Pradesh . وتقدر احتياطات الهند من اليورانيوم المعروفة الآن بحوالى ٧٨٢٥٠ طن من أكسيد اليورانيوم بالصيغة (U_3O_8) إلا أن عمليات الاستكشاف أظهرت وجود مناطق أخرى تحوى ترسبات كبيرة من اليورانيوم. بالإضافة إلى ذلك، هناك عدة آلاف من أطنان اليورانيوم الموجود مع النحاس اكتشفت في منجم لاستخلاص النحاس في منطقة سينغبوم Singhbhum . ولا تزال التقنيات الخاصة بقياس هذه المصادر تحت التطوير.



شكل (٣-٤): مناطق تعدين اليورانيوم في الهند.

تعددين اليورانيوم ومعالجته Uranium Mining and Processing

تعددين اليورانيوم Mining of Uranium

يتضمن استخلاص اليورانيوم عمليات تعددين الخام ومعالجته كيميائياً لفصل اليورانيوم. ويمكن تعددين اليورانيوم من تحت الأرض أو من سطح الأرض حسب طبيعة ترسباته. ويوجد حالياً في الهند منجمان أحدهما في جادوجودا ينتج ١٠٠٠ طن من الخام في اليوم والثاني في بهاتين ينتج حوالي ٣٧٠ طناً من الخام في اليوم، والموقع الثالث الذي سيكتمل في ناروابهار يتوقع أن ينتج ٧٢٠ طناً من الخام يومياً.

بدأ العمل في منجم جادوجودا في فبراير عام ١٩٦٣ م، في حين أن الإنتاج التجاري لهذا المنجم بدأ في مايو عام ١٩٦٨ م. وفي المرحلة الأولى، تم تعددين اليورانيوم الذي يوجد على عمق ٣١٥ متراً، وقد زيد العمق إلى ٦٢٠ متراً لجمع كميات أكبر من اليورانيوم. وفي الوقت الراهن وصل عمق المنجم إلى ٨١٥ متراً. وينقل الخام المجموع من منجمي جادوجودا وبهاتين إلى المطحنة في جادوجودا لاستخلاص اليورانيوم. كذلك، يرسل الخام المجموع من ناروابهار إلى المطحنة نفسها أيضاً. وقد أنشئت محطات قريبة من مناجم النحاس في سوردا Surda وموسيانى وراكها لاستخلاص اليورانيوم من الخام بعد استخلاص النحاس منه. وتعالج مخلفات هذه المواقع لفصل المعادن الثقيلة التي تحوي من ٠,١ إلى ٠,٢ ٪ من أكسيد اليورانيوم (U_3O_8) في محطات تجريبية لتطوير التقنية. وترسل هذه الرواسب من منجم النحاس إلى جادوجودا كي تعالج مع الخام من جادوجودا وبهاتين.

كيمياء اليورانيوم Chemistry of Uranium

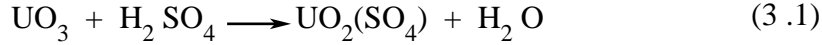
اليورانيوم هو أحد أعضاء سلسلة الأكتينيدات Actinides التي تحوي ١٤ عنصراً، حيث أن الغلاف الإلكتروني الخامس والسادس والسابع وكذلك

الغلاف الفرعية غير ممتلئة تماماً. ويحوي اليورانيوم في حالته الفلزية ٢١ إلكترونات في الغلاف الخامس ($5S^2, 5P^6, 5d^{10}, 5F^3$) و ٩ إلكترونات في الغلاف السادس ($6S^2, 6P^6, 6d^1$) وإلكترونين في الغلاف السابع ($7S^2$). وتساهم هذه الإلكترونات في الروابط الكيميائية لليورانيوم، ولهذا فإن له تكافؤات مختلفة تتراوح بين $+3$ و $+6$. فاليورانيوم يمكن أن يتحد مع الفلور ليكون UF_3 و UF_4 و UF_5 و UF_6 . واليورانيوم الثلاثي التكافؤ يمكن تحضيره في محلول ولكنه غير ثابت، حيث يتفاعل مع الماء وينطلق الهيدروجين. وكذلك، فإن اليورانيوم رباعي التكافؤ غير ثابت بالنسبة للأكسدة تحت ظروف خاصة. ويوجد اليورانيوم خماسي وسداسي التكافؤ بشكل مؤكسد في المحلول. واليورانيوم سداسي التكافؤ مثل UO_2^{2+} هو الأكثر ثباتاً في المحاليل المائية. وأيونات اليورانيوم هي أيونات قابلة لاستقبال إلكترون ولديها الاستعداد لتكوين رابطة تناسقية مع أيونات المعقدات والمركبات. وعلى سبيل المثال فإن أيون اليورانيل (UO_2^{2+}) يمكن أن يكون معقداً من النوع $UO_2 \cdot SO_4$ و $UO_2 \cdot (SO_4)_2^{2-}$ ، وكذلك $UO_2 \cdot (SO_4)_3^{4-}$ وغيرها. ويمكن أن تتكون معقدات مشابهة مع النترات (NO_3^-) والكربونات (CO_3^{2-}) والأيونات الأخرى. أيضاً فإن أيونات اليورانيوم تكون معقدات مع المذيبات المانحة للإلكترون مثل الإثيرات والكيوتونات وألكيل فوسفات $alkyl phosphates$. وتنمياً أيونات اليورانيوم تحت الظروف التي تكون فيها الحامضية منخفضة جداً.

استخلاص اليورانيوم من الخام *Recovery of Uranium from Ore*

يصل الخام إلى المطاحن على شكل حجارة صغيرة تحوي ما يقارب ٠,٠٧٪ من اليورانيوم وتطحن هذه الحجارة إلى بودرة دقيقة قطر حبيباتها ٠,١ مم أو أقل. وقبل معالجة هذا الخام بالأحماض لاستخلاص اليورانيوم يمكن استخلاص النحاس الذي يشكل ٠,٠٨٪ والمليدينوم ٠,٠٢٪، اللذين يوجدان عادة في هذا النوع من الخام، ويتم فصلهما ككبريتات. وبعد ذلك يعالج الخام

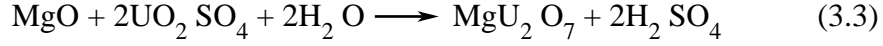
لفصل الماجنيتايت (Magnetite) الذي يشكل ٣ ٪. و تعالج بوردرة الخام بعد ذلك بحمض كبريتيك مخفف مع إضافة كمية بسيطة من أكسيد المنجنيز حسب التفاعل:



وبالتحكم المناسب في ظروف الاستخلاص فإنه يمكن الحصول على استخلاص انتقائي لليورانيوم من بوردرة الخام لوجود خواص ذوبان تفضيلية لأكاسيد اليورانيوم. وتتم عملية الاستخلاص في أوعية إسطوانية خاصة تسمى باشيوكس (Pachucas) ، وبذلك فإن أكثر من ٩٦ ٪ من اليورانيوم الموجود في الخام يتم استخلاصه.

وتستخدم معظم الدول طريقة استخلاص اليورانيوم من الخام بواسطة الأحماض. وفي قليل من الأماكن التي يكون فيها تركيز اليورانيوم في الخام عالياً يستخدم محلول كربونات الصوديوم للتصفية. ويكون تركيز اليورانيوم في المحلول بعد التصفية باستخدام الأحماض هو عدد من الجرامات في اللتر الواحد. ويحوي هذا المحلول شوائب عدة يجب التخلص منها للحصول على ناتج غني باليورانيوم. وفي الحقيقة فإن تركيز اليورانيوم في المحلول المستخلص يكون أقل من تركيز كثير من الشوائب كما هو موضح في الجدول (٣-١). ولحسن الحظ فإن اليورانيوم يكون معقدات أيونية ويظهر في محلول التصفية على شكل $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2^{2-}$ وكذلك $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$. وتتم الخطوة الأولى للتنقية باستخدام عمود فصل أيوني. واليورانيوم المتبقي في عمود الفصل يتم الحصول عليه كمحلول بتمرير محلول من أحد الأملاح على عمود الفصل مما يجعله جاهزاً لإعادة الاستخدام. كذلك يتم ترسيب اليورانيوم من المحلول بإضافة أكسيد المغنسيوم أو الدولوميت (Dolomite) لانتاج المغنسيوم ثنائي اليورانيوم الذي يعرف بالعجينة الصفراء (Yellow cake) بسبب اللون

الأصفر لهذا الراسب:



وحيث أن اليورانيوم في هذه المرحلة لا يزال غير نقي، فإنه يتم نقله إلى منشأة الوقود النووي في حيدر أباد (Hyderabad). وتتم تنقية هذا اليورانيوم للحصول على يورانيوم صالح للاستخدام كوقود نووي بواسطة الاستخلاص الانتقائي بالمذيبات حيث يستخدم لهذا الغرض المذيب ثلاثي بيوتيل الفوسفات (TBP). فعندما يخلط محلول نترات اليورانيوم مع ٣٠ ٪ ثلاثي بيوتيل الفوسفات (TBP) المذاب في كيروسين، فإنه يكون معقداً هو $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 2TBP الذي يتم استخلاصه في الطبقة العضوية. ويعاد اليورانيوم المستخلص في الطبقة العضوية إلى الطبقة المائية بخلط الطبقة العضوية مع الماء، وبعد ذلك، يتم ترسيب اليورانيوم بإضافة الأمونيا للحصول على أمونيوم ثنائي اليورانيوم، التي يتم تسخينها في الهواء للحصول على ثالث أكسيد اليورانيوم، وبعد ذلك يتم اختزاله بالهيدروجين عند درجة حرارة ٦٠٠ م° للحصول على ثاني أكسيد اليورانيوم حسب المعادلة:



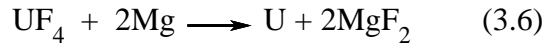
الشوائب	محلول التصفية	العجينة الصفراء	أكسيد اليورانسيوم	مواصفة بودة أكسيد اليورانسيوم
U	10^6	10^6	10^6	10^6
Fe	5.9×10^6	6×10^3	30	50
SiO ₂	2.0×10^6	5.4×10^4	25	30
SO ₄	49.0×10^6	8.2×10^3	-	-
P ₂ O ₃	$(0.6-1) \times 10^6$	1.7×10^3	-	-
Mn	$(4-1) \times 10^6$	-	2	5
R.E.	4×10^5	2×10^3	-	-
Cl-		4.3×10^3	-	-
Th	-	4.7×10^2	150	50
Ca+Mg	-	1.0×10^5	25 (Ca)+3 (Mg)	50
Al	-	-	10	10
B	-	-	0.1+0.3	0.3
Cd	-	-	0.1	0.2
Cu	-	-	6	10
Cr	-	-	10	15
Dy	-	-	0.1	-
F	-	-	5	-
Gd	-	-	0.04	-
Mo	-	0	5	2
Ni	-	-	2	20

جدول (١-٣) الشوائب المعتادة في اليورانسيوم في المراحل المختلفة
من تنقيته وتراكيزها بوحدة جزء من المليون (ppm).

اليورانيوم ومركباته Uranium and its Compounds

فلز اليورانيوم Uranium metal

يستخدم فلز اليورانيوم كوقود في المفاعلات المبردة بالغاز وفي عدد من مفاعلات الأبحاث. فمفاعلا الهند للأبحاث يستخدمان فلز اليورانيوم كوقود. وينتج فلز اليورانيوم باختزال رباعي فلوريد اليورانيوم UF_4 بواسطة فلزي الكالسيوم أو المغنسيوم حسب التفاعل:



وهذا تفاعل طارد للحرارة بطبيعته. والحرارة الناتجة من عملية الاختزال هذه كافية لأن يكون الملح والفلز الناتجان منصهرين ومنفصلين عن بعضهما. يصنع فلز اليورانيوم في الهند في مصنع مخصص لهذا الغرض في مركز بهابها للبحوث الذرية (BARC) ويتم إنتاج ١٥٠ كجم من الفلز في كل دورة إنتاج. ومن المتوقع أيضاً أن يكون فلز اليورانيوم مفيداً مع فلز البلوتونيوم لإنتاج وقود المفاعلات الولودة السريعة.

وكثافة فلز اليورانيوم هي ١٩,٠٧ جرام/سم^٣ وهو أثقل ٢,٥ مرة من الفولاذ و ١,٥ مرة من الرصاص. واليورانيوم فلز فضي اللون إلا أنه يتحول إلى الأسود عند تعرضه للهواء بسبب تأكسد سطحه. وبالتالي يمكن تداول قطع كبيرة من فلز اليورانيوم في الهواء لكون التأكسد لا يتم إلا على السطح فقط. ولكن القطع الناتجة عند تشغيل اليورانيوم أو عند طحنه يمكن أن تشتعل في الهواء. لذلك يجب الحذر عند التعامل معه. ويتفاعل اليورانيوم، كذلك، مع الماء ولكن طبقة الأكسيد الرقيقة تمنع تغلغل التفاعل عند درجة حرارة أقل من ١٠٠ درجة مئوية. وينصهر فلز اليورانيوم عند ١١٣٢ درجة مئوية. وعلى كل فإنه قبل الانصهار يحدث تغير في التركيب الفيزيائي للفلز، حيث يتحول من طور ألفا إلى طور بيتا عند درجة حرارة ٦٦٢ درجة مئوية، ثم يتحول من طور بيتا إلى طور جاما عند درجة حرارة ٧٧٥ درجة مئوية. وتترافق هذه التغيرات بتغير كبير في كثافة الفلز.

ثاني أكسيد اليورانيوم Uranium Dioxide

في عملية استخلاص اليورانيوم. تطرقنا إلى أكسيدين هما ثالث أكسيد اليورانيوم (UO_3) حيث يكون اليورانيوم سداسي التكافؤ، وثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) حيث يكون اليورانيوم رباعي التكافؤ. وعند تسخين أي من هذين الأكسيدين في الهواء لدرجة ٨٠٠ درجة مئوية نحصل على الأكسيد المعروف U_3O_8 ، حيث يكون تكافؤ اليورانيوم بين ٤ و ٦. ومن بين هذه الأكاسيد يعتبر ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) ذو أهمية بالغة. ولون هذا الأكسيد بني وكثافته ١٠,٩٧ جم/سم^٣، ودرجة انصهاره ٢٧٦٠ درجة مئوية ولديه صفات جيدة تجعله مفضلاً لاستخدامه وقوداً في المفاعلات. وأحد أهم هذه الصفات هي ثبات تركيبه حتى درجة انصهاره، وكذلك توافقه الجيد مع سبائك التغليف رغم أن كثافته هي نصف كثافة فلز اليورانيوم، وهذا غير مفضل من الناحية الفيزيائية للمفاعل، حيث أن التركيب المفتوح لهذه المادة يعطي حيزاً لاحتواء نواتج الانشطار النووي أثناء توليد الطاقة. وعلى ذلك فإن الوقود المعتمد على ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2 لا ينتفخ بشكل كبير مقارنة بالوقود الأعلى كثافة.

كربيد اليورانيوم Uranium Carbide

يمكن تحضير اليورانيوم أحادي الكربيد بتفاعل فلز اليورانيوم مع الكربون أو الميثان أو بتفاعل أكسيد اليورانيوم مع الكربون حسب التفاعل:

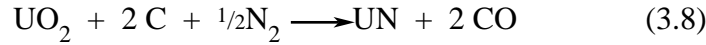


ولا يمكن استخدام الكربيد في المفاعلات المبردة بالماء لأن الكربيد سريع التفاعل مع الماء، ولكنه وقود جيد للمفاعلات الولودة السريعة التي تستخدم الصوديوم المنصهر كمبرد. وكثافة كربيد اليورانيوم هي ١٣,٦ جرام/سم^٣ ودرجة إنصهاره ٢٥٠٠ درجة مئوية وتوصيليته الحرارية تساوي حوالي ضعف التوصيلية الحرارية لثاني أكسيد اليورانيوم. لذلك، فهو أفضل من

الأكسيد كوقود. ويكون اليورانيوم نوعين آخرين من الكربيدات هما (U_2C_3) حيث تكون نسبة الكربون ١,٥ من نسبة اليورانيوم ويسمى Sesquicarbide ، والنوع الآخر ثنائي الكريد (UC_2) بنسبة كربون ٢ . إلا أن هذه الكربيدات لا تستخدم في تطبيقات وقود المفاعلات الولودة السريعة بسبب نشاطها التفاعلي مع مواد التغليف كالفلوذا. واليورانيوم ثنائي الكريد (UC_2) يستخدم كوقود للمفاعلات عالية الحرارة المبردة بالغاز High Temperature Gas Cooled Reactor التي يستخدم فيها الجرافيت كمادة تغليف.

نيتريد اليورانيوم Uranium Nitride

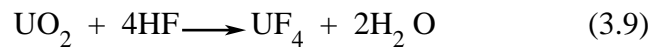
يحضر اليورانيوم أحادي النيتريد بتفاعل فلز اليورانيوم مع النيتروجين أو الأمونيا حسب التفاعل التالي:



وكثافة نيتريد اليورانيوم هي ١٤,٣٢ جرام/سم^٣ ودرجة انصهاره ٢٦٣٠ درجة مئوية وتوصيلته الحرارية مشابهة للكريد. ولأحادي النيتريد مستقبل واعد في مجال استخدامه كوقود للمفاعلات السريعة Fast Reator .

رباعي فلوريد اليورانيوم Uranium Tetrafluoride

رباعي فلوريد اليورانيوم هو مركب وسطي هام في تحضير فلز اليورانيوم وكذلك في تحضير سداسي فلوريد اليورانيوم. ويتم تحضير رباعي فلوريد اليورانيوم بتفاعل ثاني أكسيد اليورانيوم مع فلوريد الهيدروجين عند درجة حرارة ٥٠٠ درجة مئوية:



والفلوريد الناتج أخضر اللون ولهذا يعرف بالملح الأخضر.

سداسي فلوريد اليورانيوم Uranium Hexafluoride

يحضر سداسي فلوريد اليورانيوم عن طريق تفاعل رباعي فلوريد اليورانيوم مع الفلور عند درجة حرارة ٥٠٠ - ٤٠٠ درجة مئوية:



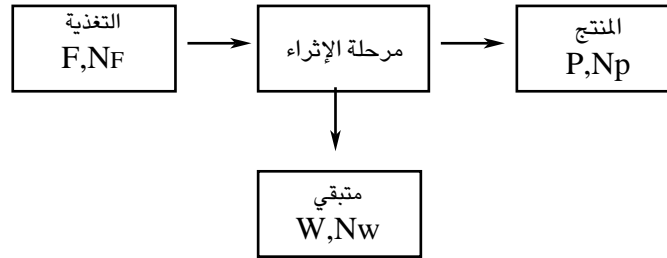
وسداسي فلوريد اليورانيوم هو مادة صلبة بيضاء تتسامى بشكل مشابه لكلوريد الأمونيوم عند تسخينها إلى درجة ٥٦ درجة مئوية. وحتى عند درجة حرارة ٢٠ درجة مئوية فإن ضغط بخار سداسي فلوريد اليورانيوم فوق سطح المادة الصلبة يصل إلى ٠,١ ضغط جوي. والطبيعة الغازية لهذا المركب جعلته مفيداً في عملية إثراء اليورانيوم ٢٣٥ في اليورانيوم الطبيعي. ومركب سداسي فلوريد اليورانيوم هو مادة شديدة التفاعل وتتأثر بالرطوبة ويتطلب التعامل معها حذراً خاصاً. والأوعية المصنوعة من سبيكة النيكل والألمنيوم هي فقط المفيدة في نقل هذا المركب (UF_6) والتعامل معه وذلك لأنه عامل تآكل قوي.

إثراء اليورانيوم Uranium Enrichment

اليورانيوم ٢٣٥ هو النظير الانشطاري (Fissile) الوحيد في اليورانيوم الطبيعي بوفرة مقدارها ٠,٧١٥ ٪. ولاستخدام اليورانيوم ٢٣٥ (^{235}U) في عدد من التطبيقات فإن تركيزه يجب أن يزداد (وهذا ما يطلق عليه الإثراء أو التخصيب). فالمفاعلات مثل مفاعلات الماء المغلي ومفاعلات الماء المضغوط، تتطلب تركيزاً في حدود ١,١ - ٤,٠ ٪ من اليورانيوم ٢٣٥. وفي التفجيرات النووية فإن تركيز اليورانيوم ٢٣٥ يجب أن يكون أعلى من ١٠ ٪ لأن أقل من هذا التركيز لا يمكن جعل فلز اليورانيوم المثري ينفجر. وكمية اليورانيوم التي يجب أن تتكون منها المادة المتفجرة التي تسمى الكتلة الحرجة تعتمد بشكل أساسي على تركيز اليورانيوم ٢٣٥. فمثلاً ١٠٠٠ كجم من فلز اليورانيوم سوف يكون كتلة حرجة عندما يكون تركيز اليورانيوم ٢٣٥ هو ١٠ ٪. وكميات اليورانيوم المطلوبة لتحقيق الكتلة الحرجة لتراكيز مختلفة من

اليورانيوم ٢٣٥ هي ٢٥٠ كجم و ٥٠ كجم و ١٥ كجم لتراكيز اليورانيوم ٢٠٪ و ٥٠٪ و ١٠٠٪ على التوالي.

واليورانيوم الداخل في محطة الإثراء يكون له تركيز معروف من اليورانيوم ٢٣٥، ويكون الناتج من المحطة أكثر ثراءً باليورانيوم ٢٣٥ ويعتبر اليورانيوم ذو التركيز المنخفض من اليورانيوم ٢٣٥ بمثابة النفايات ويطلق عليه المتبقي (tails) ويمكن تمثيل العملية بالمخطط التوضيحي التالي:



حيث أن F و P و W هي كميات سداسي فلوريد اليورانيوم (UF_6) في اليورانيوم الوارد للمنشأة وفي المنتج على الترتيب. أما الرموز N_F ، N_P ، N_W فهي ترمز لتراكيز اليورانيوم ٢٣٥ في هذه المراحل. ونسب اليورانيوم ٢٣٥ إلى اليورانيوم ٢٣٨ في هذه المراحل الثلاث يمكن تعريفها بالعلاقة:

$$R = N/(1 - N) \quad (3.11)$$

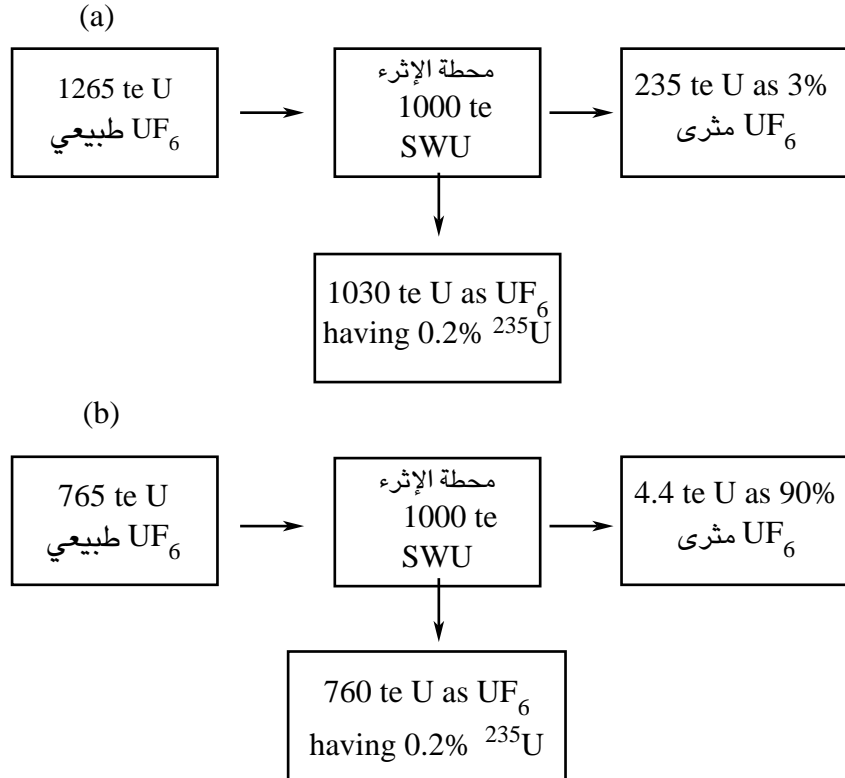
ومعامل الفصل q يمكن تعريفه على أنه نسبة R_P في المنتج إلى R_W في المتبقي (النفاية) أي أن:

$$q = R_P / R_W \quad (3.12)$$

وجميع عمليات الإثراء المستخدمة حالياً أو التي يمكن استخدامها تعتمد على كون اليورانيوم على هيئة غاز (أو بخار). وأول عملية لإثراء اليورانيوم ٢٣٥ تمت بواسطة بخار رابع كلوريد اليورانيوم المؤين. وقد تم فصل النظير باستخدام عدد من أجهزة مطياف الكتلة ذات نوعيات مختلفة تسمى

كالوترونات (Calutrons). إلا أنه ثبت أن هذه الطريقة باهظة التكاليف. والطرق البديلة لهذه الطريقة (عدا طريقة واحدة) تعتمد على استخدام غاز سادس فلوريد اليورانيوم، وطريقة أخرى تعتمد على استخدام بخار فلز اليورانيوم.

ونظراً لأن الاختلاف في خواص $^{235}\text{UF}_6$ ، $^{238}\text{UF}_6$ ، هو اختلاف قليل جداً فإن معامل الفصل في كل خطوة يكون صغيراً جداً، ولهذا يتطلب الأمر إعادة عملية الفصل على مراحل متعددة للحصول على نسبة الإثراء المطلوبة. وتقاس قدرة الإثراء للمنشأة بالكيلو جرام أو بعدد الأطنان من الوحدات العاملة في الفصل (Separative Work Units (SWU). وبسبب تعقيد هذا المصطلح يمكن شرحه بمثالين لمنشأتين إثراء كلاهما ذات قدرة ١٠٠٠ طن، إحداهما (a) تنتج ٣٪ من اليورانيوم ^{235}U (٢٣٥) والأخرى (b) تنتج ٩٠٪ من اليورانيوم ^{235}U (٢٣٥):



وطريقة الانتشار الغازي Gaseous diffusion وطريقة الطرد المركزي الغازي Gas centrifuge هما الطريقتان المستخدمتان تجارياً لتخصيب نظائر اليورانيوم.

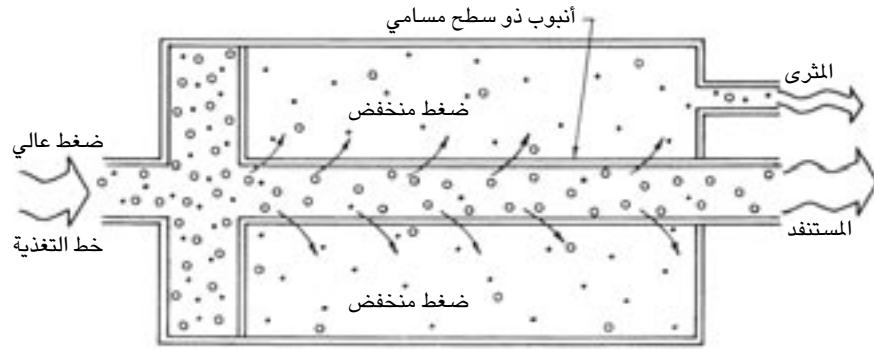
الانتشار الغازي Gaseous Diffusion

نظراً لأن جزيئات سادس فلوريد اليورانيوم $^{235}\text{UF}_6$ هي الأخف (كتلتها التقريبية = ٣٤٩ وحدة كتلة ذرية) تكون سرعة هذه الجزيئات أعلى من سرعة جزيئات سادس فلوريد اليورانيوم $^{238}\text{UF}_6$ الأثقل (كتلتها التقريبية = ٣٥٢ وحدة كتلة ذرية) عند درجة حرارة محددة. وهذا هو أساس طريقة الإثراء بواسطة الانتشار الغازي. فعندما يضغط غاز سادس فلوريد اليورانيوم UF_6 ، كي ينتشر من خلال حاجز مسامي ذو فتحات ضيقة، فإن جزيئات غاز سادس فلوريد اليورانيوم $^{235}\text{UF}_6$ سوف تنتشر أسرع من جزيئات غاز سادس فلوريد اليورانيوم $^{238}\text{UF}_6$ ، وبالتالي فإن الغاز الخارج من الحاجز سيكون أغنى (أكثر ثراءً) بجزيئات سادس فلوريد اليورانيوم $^{235}\text{UF}_6$ بدرجة بسيطة (شكل ٣-٥). ومعامل الفصل في مرحلة مثالية واحدة من هذه العملية يبلغ ١,٠٠٤٣ تقريباً. إلا أن المعامل المتحصل عليه عملياً هو فقط ١,٠٠١٤، ولهذا السبب فإن أي منشأة إثراء تعمل بالانتشار الغازي سوف تحوي مايقارب ١٣٠٠ مرحلة لإنتاج يورانيوم مثرى إلى نسبة ٣٪ فقط. ولتشغيل محطة تعتمد على الانتشار الغازي فإن الأمر يتطلب معدل طاقة كهربائية مرتفع أي مايقرب من ٣٠٠٠ كيلوواط. ساعة/كجم.

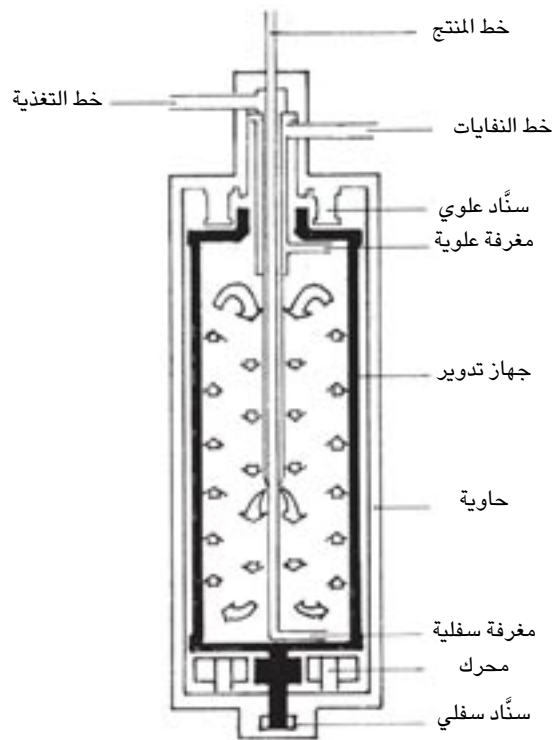
الطرد المركزي الغازي Gas Centrifuge

من المعلوم أن الاجسام الأثقل تترسب في القاع تحت تأثير الجاذبية. فعندما تمتلئ غرفة بغاز سادس فلوريد اليورانيوم فإن الغاز القريب من سقف الغرفة سوف يكون غني بجزيئات سادس فلوريد اليورانيوم $^{235}\text{UF}_6$ وإذا زادت القوى

المؤثرة على الجزيئات فإن معامل الفصل سوف يزيد. ويمكن أن يتم ذلك بوضع الغاز في جهاز طرد مركزي عالي السرعة يدور عند سرعة تقارب ٥٠ ألف دورة في الدقيقة. عندئذ تكون الجزيئات خاضعة لقوة تزيد على قوة الجاذبية بمقدار ٢٥٠ ألف ضعف. وتحت هذه الظروف، فإن نسبة وجود النظائر بين مركز وعاء الطرد المركزي وجداره الخارجي ستكون ١,١٤٧، مع أنه ستوجد هناك كمية قليلة من الغاز قريبة من مركز وعاء الطرد المركزي. ويمكن وضع تصميم لاسطوانة الطرد المركزي كي تعمل كوحدة متعددة المراحل بحيث تنتج كل اسطوانة طرد مركزي معامل فصل بمقدار ١,٥ (شكل ٣-٦). وبسبب السرعة الفائقة التي يجب أن يدور بها جهاز الطرد المركزي فإن كل وحدة من الوحدات يجب أن تكون صغيرة الحجم (أي بطول ١,٥ متر وبقطر ٠,٢ متر). ويجب استخدام عدد كبير من أجهزة الطرد ليفي بإنتاج الكمية المطلوبة من اليورانيوم المثري للمفاعلات. فالمصنع الذي ينتج ١٠٠٠ طن وحدة فصل عاملة (1000 te SWU) في السنة يتطلب ٦٦ ألف جهاز طرد مركزي. ومع ذلك فإن نسبة الإثراء ستبلغ ٣ ٪ في المرحلة الثالثة عشرة تقريباً. وعلى الرغم من العدد الهائل من الوحدات التي يتطلبها المصنع إلا أن كمية الكهرباء المستهلكة في هذه العملية هي عشر الكمية المستهلكة فقط في عملية الانتشار الغازي، أي ٣٠٠ كيلوواط. ساعة / كجم .



شكل (٣ - ٥): الإثراء بطريقة الانتشار الغازي.



شكل (٣ - ٦): الإثراء بالطرد المركزي الغازي لسادس فلوريد اليورانيوم $^{235}\text{UF}_6$.

طرق الديناميكا الهوائية Aerodynamic Methods

تعتمد هذه الطرق على فروق الضغط المتولدة نتيجة تيار عالي السرعة من الغازات يمر في ممر منحنى. وكما يحدث في عملية الطرد المركزي فإن الجزيئات الأثقل وهي هنا جزيئات غاز سادس فلوريد اليورانيوم $^{238}\text{UF}_6$ تميل للتركز في الجانب الخارجي من المنحنى. وهناك عمليتان تعتمدان على هذا المبدأ هما الفوهة النفثة jet nozzle المطورة بواسطة الألمان وعملية هليكون Helikon المطورة بواسطة علماء جنوب أفريقيا.

وفي عملية الفوهة النفثة Jet Nozzle، فإن خليط من سداسي فلوريد اليورانيوم و ٩٦٪ من الهيدروجين يسمح له بالتمدد خلال ممر ضيق يبلغ عرضه ٠,٠٥ مم وفوهة نصف قطرها ٠,١ مم. فالغاز الذي يمر بسرعة من فوهة الممر يتعرض لقوة تساوي ١٦٠ مليون مرة ضعف قوة الجاذبية. والتيار الخارج من الفوهة ينقسم إلى جزيئات خفيفة وثقيلة بواسطة فاصل حاد والأنبوب الذي يحوي ٨٠ من مثل هذه المنحنيات يكون ذا معامل فصل مساو ١,٠١٤٨ وباستخدام ٧٤٠ مرحلة من هذه المراحل يمكن إنتاج يورانيوم مثرى حتى نسبة ٣٪. والطاقة المستخدمة ستصل إلى أعلى من ٣٠٠٠ كيلو واط. ساعة/كجم.

وفي عملية هليكون Helikon، أو عملية يوكور UCOR، فإن سداسي فلوريد اليورانيوم UF_6 يخلط مع الهيدروجين بنسبة ٩٨ - ٩٩٪ للهيدرجين و يحقن بسرعة عالية باتجاه مماس للسطح الداخلي للأنبوب. وعندما ينتقل الغاز في الأنبوب فإن المركب الأخف (جزيئات سادس فلوريد اليورانيوم $^{235}\text{UF}_6$) سوف تتركز حول المحور، وبالتالي فإن هذا اليورانيوم المثرى يمكن أن يسحب من مركز الأنبوب من الجهة المقابلة. وقد تم الحصول على معامل فصل في مرحلة واحدة يقدر بحوالي ١,٠٣ عند استخدام أنبوب قطره ٣,٥ مم وطوله ١٠ مم. وللحصول على درجة إثراء تصل إلى ٣٪ يلزم ١٠٠ مرحلة، والطاقة

- ١٠٠ -