الفصل السادس

عصر الطاقة النووية
THE NUCLEAR ENERGY ERA

(٦,٠) خلفية تاريخية
Historical Perspective

بدأ العصر النووي مع خلق كوكب الأرض قبل حوالي أربعة مليارات سنة. ومن بين العناصر الكيميائية الأولى المكونة لقشرة الأرض والتي كانت تزيد عن التسعين، هناك العديد من العناصر المشعة (مثل الهيدروجين والكربون والبوتاسيوم واليورانيوم وغيرها)، ويعني ذلك أنها تتحلل بشكل تلقائي لتصبح عناصر كيميائية أخرى. إن الشمس، وهي مصدر طاقة الأرض كلها تقريباً، عبارة عن مفاعل نووي حراري نجمي يشع الطاقة النووية إلى جميع أرجاء النظام الشمسي بفعل التفاعلات النووية التي تحدث داخلها بشكل مستمر. لقد كانت هناك مفاعلات نووية طبيعية على الأرض قبل حوالي ملياري سنة وبقيت لمدة ٥٠٠ ألف سنة تقريباً. سيتم في هذا الفصل شرح الكيفية التي حدث بها ذلك وكيفية علمنا بوجود تلك المفاعلات. لقد بدأت الطاقة النووية بشكلها المألوف اليوم في أواخر القرن التاسع عشر وبرزت عام ١٩٠٥م بسبب معادلة آينشتاين $E=mc^2$ التي ربطت بين الكتلة والطاقة، وتطورت الطاقة النووية بشكل ثابت خلال النصف الأول من القرن العشرين مع تطوير القنابل الذرية

والهيدروجينية كأسلحة عسكرية ومع بداية العصر النووي الذي شيدت فيه مفاعلات القدرة النووية الانشطارية ومع البحث عن مفاعلات نووية حرارية يمكن التحكم فيها والتي يمكن في المستقبل أن تحاكي طاقة الشمس هنا على الأرض.

ويمكن أن تلعب الكهرباء التي تنتجها مفاعلات القدرة النووية دوراً مهماً في إنتاج الهيدروجين على مستوى العالم ليستخدم كوقود مستدام ونظيف بيئياً. إن تقنية تشييد وتشغيل مفاعلات القدرة النووية الضخمة والآمنة معروفة بشكل جيد، حيث يتم تشغيل المفاعلات النووية حالياً في معظم الدول المتقدمة في العالم منتجة ما يتراوح بين بضع أجزاء من المائة إلى ما يزيد على ٧٠٪ من الطلب الوطني على الكهرباء.

يستعرض هذا الفصل تقنية استخدام الطاقة النووية لتساعد في الإنتاج واسع النطاق للهيدروجين بطريقة التحليل الكهربائي (electrolysis) وربما بالتحليل الحراري للماء في المستقبل. يستخدم في هذا الفصل نموذج "هندسي" للذرة تحتوي فيه النواة على البروتونات والنيوترونات فقط وتكون محاطة بإلكترونات تدور حولها. يقوم هذا النموذج بشرح علم الطاقة النووية بطريقة تفي بغرض توضيح تقنية إنتاج الطاقة الكهربائية الوفيرة بطريقة الانشطار النووي. يغطي النموذج البنية الأساسية لنواة الذرة والتكوين النظائري (isotopic) ووفرة النظائر والكتلة الذرية وتكافؤ الكتلة والطاقة حسب معادلة آينشتاين من خلال حساب طاقة الترابط (binding energy) التي هي مصدر الطاقة النووية سواء نتيجة الانشطار النووي أو الاندماج النووي الحراري. ويغطي النموذج جوانب الاستقرار النووي والأنواع المهمة من الإشعاع والنشاط الإشعاعي.

ويستعرض هذا الفصل تقنية محطات القدرة النووية (سواء الحالية أو التصميمات المستقبلية) وإمكانية أن تنتج محطات القدرة النووية القدرة الكهربائية ووقود الهيدروجين معاً. يؤدي تشغيل مثل هذه المحطات عند ظروف ثابتة (حالة الحمل الأساسي baseload) مع التغيرات اليومية في الطلب على الطاقة الكهربائية إلى كفاءة

أكبر، كما أنه يزودنا بالقدرة الكهربائية وبوقود الهيدروجين بأقل تكلفة. وينتهي الكتاب في الفصل العاشر إلى أنه من الممكن أن تكون هناك مناطق معزولة للطاقة (isolated energy parks) تعضد فيها موارد الطاقة النووية والمتجددة بعضها بعضاً بهدف تحقيق أقصى درجة من الأمان والكفاءة وأقل تكلفة للطاقة الكهربائية ووقود الهيدروجين.

(٦,١) العناصر الأساسية لعلم النواة
Basic Elements of Nuclear Science

من الملائم في شرح علم نواة الذرة لطلاب الهندسة استخدام أسلوب "هندسي" يُصَوَّر فيه التركيب النووي على أنه نواة شديدة الترابط تحتوي على كرات صلبة هي البروتونات والنيوترونات ومحاطة بإلكترونات تدور حولها. يهمل هذا النموذج عدة عقود من التقدم في أبحاث فيزياء الميزونات والكواركات والجسيمات الغريبة اللازمة لفهم الفيزياء النووية، إلا أن هذا النموذج يُمَكِّن من شرح تلك الجوانب في الفيزياء النووية التي تفسر الظواهر النووية المتعلقة بالقدرة على تشييد محطات الطاقة النووية لإنتاج الكهرباء بكميات كبيرة.

(٦,١,١) نواة الذرة The Atomic Nucleus

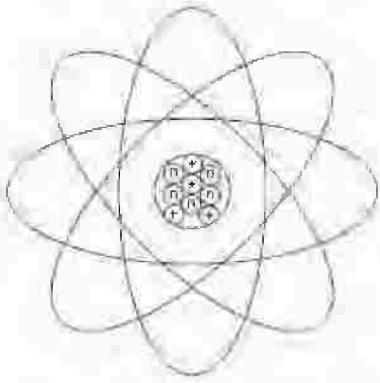
توصف بنية نواة الذرة في النموذج *الهندسي* للذرة (الشكل رقم ٦,١) بأنها نواة شديدة الترابط وتحتوي على نوعين من النويّات (nucleons):

١- البروتونات (p^+): العدد الذري للذرة والذي يرمز له بالحرف (Z) هو عدد البروتونات في النواة وهو الذي يحدد الهوية الكيميائية للذرة.

٢- النيوترونات (n): يتم تحديد عدد الكتلة للذرة والذي يرمز له بالحرف (A) عن طريق عدد البروتونات (Z) وعدد النيوترونات (N)، بحيث إن $Z + N = A$.

تحيط بالنواة :

٣- الإلكترونات (e): فالذرة المتعادلة (neutral atom) لديها Z من الإلكترونات المدارية، والإلكترونات في المدار الأبعد عن النواة (إلكترونات التكافؤ) هي التي تحدد السلوك الكيميائي للذرة.



الشكل رقم (٦,١). نموذج هندسي لنواة الذرة مع الإلكترونات المحيطة بها.

(٦,١,٢) التركيب النظائري والوفرة Isotopic Composition and Abundance

تُحَدّد هوية كل عنصر في الجدول الدوري بالعدد الذري (Z). ويوجد لمعظم العناصر في الطبيعة وضعان (combinations) ممكنان أو أكثر للنويّات وتسمى هذه الأوضاع "نظائر العنصر". ويتحدد التركيب النظائري (Z,N) بعدد الكتلة للنظير (A = Z + N). يمكن إنتاج النظائر الأخرى للعناصر بشكل اصطناعي باستخدام آلات عالية الطاقة، إلا أن معظم هذه النظائر مشعة. يمكن التعبير عن الوفرة النظائرية (f) الخاصة بنظائر كل عنصر في الجدول الدوري على أنها نسبة النظائر الموجودة للعنصر في حالته الطبيعية. يوجد في الطبيعة عشرون عنصراً [مثل الصوديوم (Z=11)، (N=12)] له نظير واحد فقط (^{23}Na). بالنسبة لهذه العناصر فإن وفرة النظائر الخاصة بالنظير الطبيعي الوحيد هي f = 1.

تضم ذرة الهيدروجين، وعددها الذري في الجدول الدوري هو ١ ، بروتوناً واحداً في النواة، لكن عنصر الهيدروجين (Z = 1) يوجد في الطبيعة بثلاثة تركيبات نظائرية :

^{1}H	N = 0	الهيدروجين الطبيعي	مستقر = الهيدروجين	f = +0.99
^{2}H	N = 1	الهيدروجين الثقيل	مستقر = الديوتريوم	f = <0.01
^{3}H	N = 2	الهيدروجين الأثقل	مشع = التريتيوم	

أما الكربون، وعدده الذري ٦ ، ففي نواته ستة بروتونات، لكن عنصر الكربون (Z = 6) يوجد في الطبيعة بأربعة تركيبات نظائرية :

^{11}C	N = 5	مشع	
^{12}C	N = 6	مستقر	f = +0.99
^{13}C	N = 7	مستقر	f = <0.01
^{14}C	N = 8	مشع	

وبالنسبة لليورانيوم، وعدده الذري ٩٢ ، ففي نواته ٩٢ بروتوناً، ولكن اليورانيوم (Z = 92) يوجد في الطبيعة بثلاثة تركيبات نظائرية :

^{234}U	N = 142	مشع	f = 0.000061
^{235}U	N = 143	مشع	f = 0.0072
^{238}U	N = 146	مشع	f = 0.9927

(٦,١,٣) الكتلة الذرية Atomic Mass

تم اعتماد معيار دولي للكتلة الذرية للعناصر عام ١٩٦١م عندما تم تعريف ذرة الكربون ^{12}C على أنها تحتوي على كتلة تبلغ ١٢ وحدة كتلة ذرية (amu) بالضبط. وتحسب الكتلة بالجرام باستخدام عدد أفوجادرو، N^{o} = ٦,٠٢٢ × ١٠^{٢٣} ذرة/جم-amu :

$$١\ \text{amu} = \frac{1}{6.022\times10^{23}} = 1.66 \times 10^{-24}\ \text{جم} \qquad (٦,١)$$

لذا فإن كتلة ذرة واحدة من ^{12}C هي ٢ × ١٠$^{-٢٣}$ جم.

وفيما يأتي كتلة كل من الجسيمات الذرية الأساسية :

البروتون p^+ = ١,٠٠٧٢٧٦٥ amu

النيوترون ^1n = ١,٠٠٨٦٦٤٩ amu

الإلكترون e^- = ٠,٠٠٠٥٤٨٦ amu

ذرة الهيدروجين ^1H = ١,٠٠٧٨٢٥٢ amu

(٦,١,٤) تكافؤ الكتلة والطاقة Eqivalence of Mass and Energy

بينما كان آينشتاين يطور نظريته النسبية الخاصة عام ١٩٠٥م، توصل إلى أن خواص الكتلة (m) والطاقة (E) متكافئة ويمكن التعبير عنها بالمعادلة :

$$E = m c^2 \qquad (٦,٢)$$

حيث إن :

c هي سرعة الضوء (٣,٠ × ١٠^{١٠} سم/ثانية في الفراغ). ويستنتج من المعادلة رقم (٦,٢) أن الطاقة الكامنة تخزن على شكل كتلة وأن تغير الكتلة في منظومة معينة يرافقه تغير مكافئ في الطاقة :

$$\Delta E = \Delta m c^2 \qquad (٦,٣)$$

تحسب الطاقة المختزنة في ١ amu كما يأتي :

$$E = ١,٦٦ \times ١٠^{-٢٤} \text{ جول} = ١,٤٩ \times ١٠^{-٣} \text{ إرج} = (٣ \times ١٠^{١٠})^٢ \qquad (٦,٤)$$

يعبر عن قيم الطاقة في العلم النووي بوحدة يسهل التعامل معها وهي وحدة إلكترون فولت (إ.ف) (eV)، وهي الطاقة التي يكتسبها إلكترون يتعرض لفرق جهد مقداره فولت واحد. وبالنسبة للتغيرات في الطاقة النووية بمقدار الملايين من الإلكترون

فولت (١ ميجا إ.ف= ١٠^٦ إ.ف)، فإن طاقة ١ amu هي ٩٣١,٤ ميجا إ.ف. ولكي يتحول إلكترون (طاقته الحركية= صفر وطاقته الكامنة (كتلة السكون) = ٠,٠٠٠٥٤٨٦ amu) إلى فوتون (كتلة السكون = صفر)، فإن الطاقة الحركية ستكون:

$$E = ٠,٠٠٠٥٤٨٦\ amu \times ٩٣١,٤ \text{ ميجا إ.ف} / amu = ٠,٥١ \text{ ميجا إ.ف} \qquad (٦,٥)$$

(٦,١,٥) طاقة الترابط Binding Energy

طاقة الترابط النووية هي "كالصمغ" الذي يحافظ على وجود البروتونات والنيوترونات سوياً في النواة. إن مجرد وجود نواة ذرة الهيليوم، والتي تحتوي على بروتونين ونيوترونين، يثير تساؤلاً حول قاعدة الفيزياء الكلاسيكية التي تقول بأن الأجسام متشابهة الشحنة تتنافر بقوة تتناسب عكسياً مع مربع المسافة بينهما. إذاً لماذا لا تؤدي قوة تنافر كولوم في نواة الهيليوم شديدة الترابط إلى انقسام النواة إلى نواتي ديوتريوم بالطريقة الآتية؟

$$^{4}He^{++} \Rightarrow {}^{2}H^{+} + {}^{2}H^{+} \qquad (٦,٦)$$

لكن الهيليوم موجود بالفعل وهو من أكثر النظائر استقراراً على الأرض، ويعتبر التفاعل العكسي:

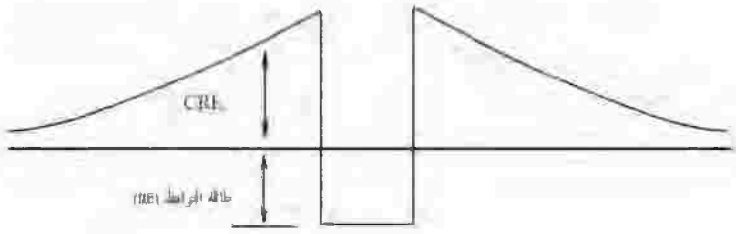
$$^{2}H^{+} + {}^{2}H^{+} \Rightarrow {}^{4}He^{++} \qquad (٦,٧)$$

مثالاً على التفاعل النووي الحراري الذي يطلق طاقة نووية على شكل طاقة ترابط. لذا من المهم أن نسلّم بوجود *قوى نووية* قادرة على تلبية مطلبين صعبين:

١- أن تكون قوية بما يكفي للتغلب على قوى تنافر كولوم الخاصة بالبروتونات العديدة موجبة الشحنة في النواة.

٢- أن تؤثر في مدى قصير وإلا فإنه سيكون من غير الممكن وجود نوى صغيرة مستقرة.

ويوضح الشكل رقم (٦,٢) مفهوم القوة النووية كطاقة ترابط.



الشكل رقم (٦,٢). نموذج هندسي لطاقة الترابط التي تحافظ على ترابط نواة الذرة.

ويمكن تحديد نصف قطر فجوة طاقة الترابط (binding energy well) بشكل تقريبي من خلال فرضية الكرة التي تحتوي على نويات شديدة التلاصق والموضحة في الشكل رقم (٦,١)، وذلك كما يأتي:

$$R = R_0 A^{1/3} \qquad (٦,٨)$$

حيث إن:

R_0 هو ثابت. تتراوح قيم R_0 والتي استنبطت من عدد من الطرق التجريبية بشكل مستقل بين ١,٢ و١,٦×١٠$^{-١٣}$ سم، ولتسهيل وضع نموذج توضيحي يمكننا التعامل مع القيمة المتوسطة البالغة ١,٤×١٠$^{-١٣}$ سم.

تعرف طاقة الترابط (BE) لنوى الذرات (^{A}Z) على أنها الكتلة التي يفقدها تركيب نظائري معين والناتجة عن اندماج مكونات النواة (Z من ذرات الهيدروجين + N من النيوترونات)، وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$BE = -Q = -\Delta m\, c^2 = -\{[Z\, m(^1H) + (A-Z)\, m(n)] - m[^AZ]\}\, c^2 \qquad (٦,٩)$$

ومن خلال القائمة الآتية للكتل الذرية (بوحدة amu)، يمكن حساب طاقة الترابط للديوتريوم والهيليوم-٤ :

الجسيم	الكتلة الذرية
N	١,٠٠٨٦٦٥
^1H	١,٠٠٧٨٢٥
^2H	٢,٠١٤١٠٢
^4He	٤,٠٠٢٦٠٤

بالنسبة للديوتريوم : Δm = ١,٠٠٧٨٢٥ + ١,٠٠٨٦٦٥ - ٢,٠١٤١٠٢

= ٠,٠٠٢٣٨٨ amu

BE = ٠,٠٠٢٣٨٨ × ٩٣١,٤ = ٢,٢٢٤ ميجا إ.ف

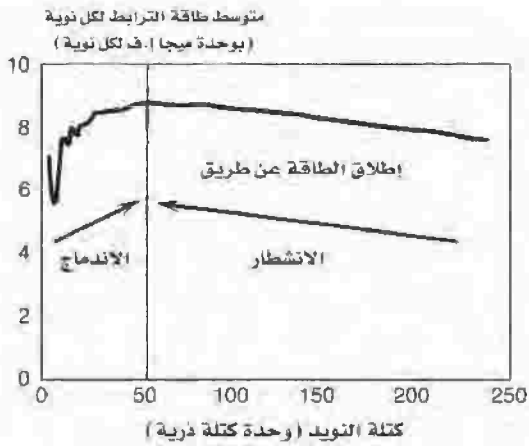
بالنسبة للهيليوم-٤ : Δm = ٢(١,٠٠٧٨٢٥) + ٢(١,٠٠٨٦٦٥) - ٤,٠٠٢٦٠٤

= ٠,٠٣٠٣٧٨ amu

BE = ٠,٠٣٠٣٧٨ × ٩٣١,٤ = ٢٨,٢٩ ميجا إ.ف

أحد المؤشرات على الاستقرار النسبي للنويدات (nuclides) هو متوسط طاقة الترابط لكل نويّة (BE/A) في النواة. ويتضح من الأمثلة السابقة أن الهيليوم-٤ (^4He) له متوسط طاقة ترابط لكل نويّة تبلغ ٤/٢٨,٢٩ = ٧,٠٧ ميجا إ.ف / نويّة، بينما الهيدروجين-٢ (^2H) له متوسط طاقة ترابط لكل نويّة تبلغ ١,١١ ميجا إ.ف / نويّة. يوضح الشكل رقم (٦,٣) متوسط طاقة الترابط لكل نويّة كدالة في عدد الكتلة للنوى

المستقرة التي تزيد وفرتها النظائرية عن ٩٠٪. ويوضح الشكل بطريقة نوعية إمكانية الاندماج النووي الحراري (للنوى الأخف) والانشطار النووي (للنوى الأثقل) وعلاقتهما بالقيمة القصوى لعدد الكتلة والبالغة ٧٥ تقريباً (مثلاً الزرنيخ، ^{75}As، والذي تبلغ طاقة الترابط لكل نويّة فيه ٨,٤ ميجا إ.ف / نويّة). وتبلغ طاقة الترابط لليورانيوم-٢٣٥ ٧,٦ ميجا إ.ف / نويّة.



الشكل رقم (٦,٣). طاقة الترابط المتوسطة لكل نوية كدالة في عدد الكتلة للنويدات المستقرة ذات الوفرة النظائرية التي تزيد عن ٩٠٪.

(٦,١,٦) الاستقرار النووي Nuclear Stability

يدل مفهوم الاستقرار النووي على قدرة الذرات على البقاء إلى "الأبد". وهناك العديد من نظائر العناصر التي تمتلك طاقة "فائضة" في أنويتها وهي نظائر غير مستقرة مع الزمن. إن التحلل الإشعاعي (radioactive decay) هو عملية التفكك التلقائي للنواة لإطلاق الطاقة الفائضة منها. يتطلب التفكك التلقائي أن تكون طاقة "التحلل" المُطلَقة

موجبة (Q > صفر، أي أن العملية مطلقة للطاقة) وعليه يجب أن يكون Δm سالباً. تعبر المعادلة الآتية عن العملية:

$$A \rightarrow B + b \qquad (٦,١٠)$$

حيث إن:

A هو النويد المشع وB هو النويد الناتج وb هو الإشعاع المنبعث.

وهناك ثلاثة أنواع مهمة من التحلل الإشعاعي في علم الطاقة النووية. ويوصف كل نوع من هذه الأنواع تبعاً لحالات الطاقة الفائضة من النويد المشع:

١- الحجم (حيث تكون النواة كبيرة للغاية).

٢- التركيب النووي الخاطئ (حيث تكون هناك نيوترونات كثيرة جداً أو قليلة جداً لكل بروتون).

٣- الحالة المتهيجة (حيث تنبعث طاقة فائضة عندما يفقد النويد تهيجه).

ومعدل التحلل الإشعاعي هو خاصية تتبع كل نويد مشع ويمكن رصدها بالقياس وتدوينها في جداول النويدات. وتعرف قيمة معدل التحلل الإشعاعي عن طريق عمر النصف للنويد المشع وهو مقياس للزمن اللازم للكمية الابتدائية من النويد المشع ليتحلل إلى نصف الكمية الأصلية. تتراوح أعمار النصف ما بين $١٠^{-٢١}$ ثانية إلى $١٠^{١٦}$ سنة أو أكثر. ومن النويدات المشعة الموجودة بشكل طبيعي في البيئة التريتيوم (^{3}H) الذي يبلغ عمر النصف له ١٢,٢٦ سنة و الكربون المشع (^{14}C) الذي يبلغ عمر النصف له ٥٧٣٠ سنة (وهو مفيد في تأريخ المومياوات المصرية) والبوتاسيوم-٤٠ (^{40}K) (f = 0.012٪) الذي يبلغ عمر النصف له $١,٢٥ \times ١٠^{٩}$ سنة.

(٦,١,٧) أنواع التحلل الإشعاعي Types of Radioactive Decay

تحلل جسيمات ألفا. جميع العناصر التي يكون لها Z > ٨٣ هي عناصر مشعة لأن أنويتها تصل إلى حجم تصبح عنده قوى التنافر الكولومية كبيرة بالنسبة للقوى

النووية. النمط الدارج من التحلل هو انبعاث جسيمات ألفا والذي تتحلل فيه النويدات المشعة كما يأتي :

$$^{A}Z \Rightarrow ^{A-4}(Z-2) + ^{4}He + Q \qquad (٦,١١)$$

على سبيل المثال بالنسبة لتحلل الراديوم إلى رادون ،

$$^{226}Ra \Rightarrow ^{222}Rn + \alpha^{++} + (4.8Mev) \qquad (٦,١٢)$$

وبعد الانبعاث تبطؤ حركة جسيمات ألفا بسبب الاصطدامات المتعددة وينتهي بها الأمر إلى اكتساب إلكترونين لتشكل ذرة الهيليوم-٤ (^{4}He).

تحلل جسيمات بيتا. عندما يزداد عدد بروتونات النواة في الجدول الدوري فإن عدد النيوترونات اللازمة لتحقيق توازن في القوة النووية (نسبة النيوترونات/ البروتونات) يزيد ، ولكن إذا أضيفت نيوترونات أخرى (أو أُخذت) إلى نويدات ذات نسبة نيوترونات/بروتونات طبيعية فإن النوى تصبح غير مستقرة بالنسبة لتحلل بيتا. تحلل بيتا هو الانبعاث التلقائي لإلكترون ذي طاقة عالية من النواة التي يتحول أحد النيوترونات فيها إلى بروتون عن طريق :

$$^{A}Z \Rightarrow ^{A}(Z+1) + \beta^{-} + \nu + Q \qquad (٦,١٣)$$

على سبيل المثال بالنسبة للكربون الإشعاعي الطبيعي ،

$$^{14}C \Rightarrow ^{14}N + \beta^{-} + \nu + Q + (156Kev) \qquad (٦,١٤)$$

تبطؤ حركة جسيم بيتا ويصبح إلكتروناً "عادياً". ومن الضروري وجود مضاد النيوترينو (antineutrino) (ν) لحفظ كمية الحركة. لقد أصبحت بذلك ذرة الكربون، والتي تحتوي على ستة بروتونات في النواة ، ذرة نيتروجين تحتوي على سبعة بروتونات في النواة.

إذا كان النويد المشع يحتوي على نيوترونات قليلة جداً فإن تحلل بيتا يتزامن مع انبعاث إلكترون موجب الشحنة (بوزيترون) يؤدي إلى إفناء إلكترون عادي في مرحلة تباطئه ليولد فوتونين طاقتهما ٠,٥١ ميجا إ.ف (كتلة سكون الإلكترونات المذكورة في المعادلة رقم ٦,٥). أحد الأمثلة هو النظير المشع للصوديوم الذي يقل عدد النيوترونات فيه بواحد عن الصوديوم المستقر (^{23}Na) ($Z = 11$) الذي يتحلل ليصبح نيون ($Z = 10$) عن طريق:

$$^{22}Na \Rightarrow {}^{22}Ne + \beta^{+} + \nu + Q + (2.8Mev) \qquad (٦,١٥)$$

ويمكن في الواقع اعتبار البوزيترون مضاد إلكترون يقترض ١,٠٢ ميجا إ.ف من طاقة كتلة السكون ثم يعيدها خلال مرحلة إفناء الإلكترون وتحوله إلى فوتونين. ولكي يحدث ذلك، فلا بد أن يكون Q أكبر من ١,٠٢ ميجا إ.ف.

تحلل أشعة جاما. توجد في كثير من الحالات نظائر مشعة لديها طاقة فائضة تخمد بإطلاق فوتون واحد أو أكثر من الطاقة من النواة دون تغيير في التركيب النووي. تسمى الحالة المتهيجة لنواة الذرة حالة شبه مستقرة، حيث يكون عدد الكتلة متبوعاً بالحرف m. يعبر عن هذه العملية كما يأتي:

$$^{Am}Z \Rightarrow {}^{A}Z + \gamma(Q) \qquad (٦,١٦)$$

يتحلل النظير المشع التيكنيتيوم-٩٩m، والذي يستخدم كمصدر لإشعاع جاما في مجال التشخيص والعلاج الطبي، بالطريقة الآتية:

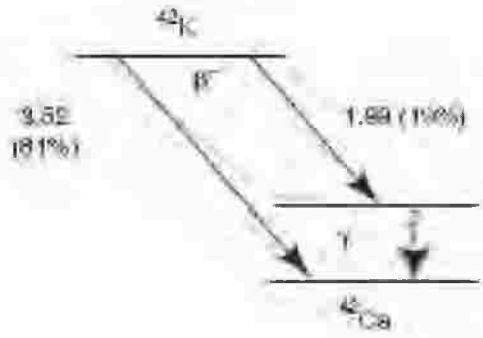
$$^{99m}Tc \Rightarrow {}^{99}Tc + \gamma(Q = 0.14\,MeV) \qquad (٦,١٧)$$

(٦,١,٨) خواص النويدات المشعة Properties of Radionuclides

هناك خاصيتان رئيستان للنظائر المشعة للعناصر وهي: (١) نمط التحلل و(٢) الصفات الحركية لعملية التحلل. تعرف الأنماط من خلال طريقة التحلل (decay scheme)

والتي تصف كيفية تحلل النويد المشع (كم ينبعث من أي نوع من الإشعاع وبأي طاقة). تحدد الصفات الحركية لعملية التحلل معدل التحلل والذي يتم التعرف عليه من خلال عمر النصف للنويد المشع.

ويوضح الشكل رقم (٦,٤) طريقة التحلل البسيطة إلى حد ما والخاصة بنويد البوتاسيوم-٤٢ المشع (^{42}K). تقدم طريقة التحلل معلومة مفادها أنه لكل ١٠٠ تحلل لنوى البوتاسيوم-٤٢ المشع سيتم انبعاث ١٩ جسيم بيتا بطاقة (تصل إلى) ١,٩٩ ميجا إ.ف (حيث يقوم مضاد النيوترينو بحمل بقية طاقة تحلل بيتا) و٨١ جسيم بيتا بطاقة (تصل إلى) ٣,٥٢ ميجا إ.ف و١٩ إشعاع جاما بطاقة ١,٥٣ ميجا إ.ف لتتشكل بذلك ١٠٠ ذرة كالسيوم-٤٢ (^{42}Ca).



الشكل رقم (٦,٤). طريقة التحلل للنظير المشع البوتاسيوم-٤٢ (^{42}K).

وتتبع عملية التحلل الإشعاعي عملية تحلل أولى (first order) يتناسب فيها معدل التحلل (D) مع الكمية الموجودة كما تبين المعادلة الآتية :

$$D = -dN/dt = \lambda N \qquad (٦,١٨)$$

حيث إن:

λ = مميز ثابت التحلل (و وحدته ١/الزمن) لكل نويد مشع.

حل هذه المعادلة التفاضلية من الدرجة الأولى هو:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{أو} \quad D = D_0 e^{-\lambda t} \qquad (٦,١٩)$$

حيث إن:

N_0 = عدد الذرات (D_0 = عدد الذرات التي تتحلل / ثانية) عند الزمن t = صفراً.

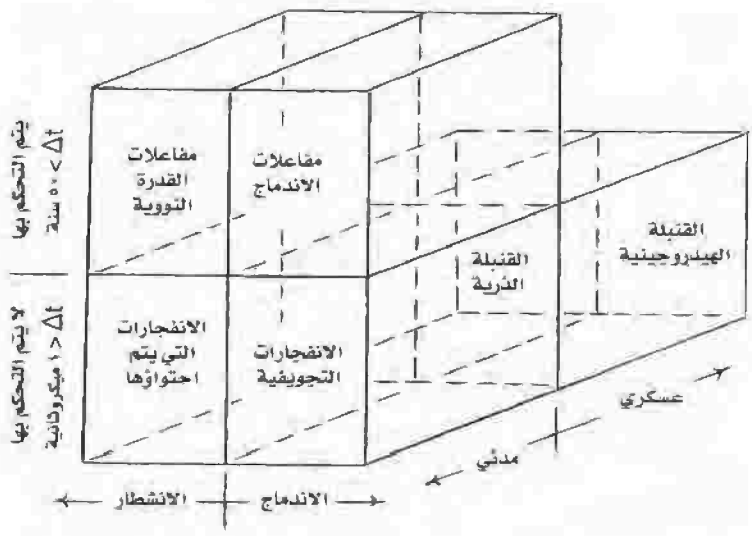
إن عمر النصف المميز، $T_{1/2}$، مجدول بالنسبة لكل نويد مشع ويعرف على أنه الزمن اللازم لتحلل نصف العدد الابتدائي: $N \longleftarrow N/2$. لذا يعطى عمر النصف بالعلاقة: $T_{1/2} = \ln 2/\lambda$. كان التحلل الإشعاعي يقاس في الأصل بوحدة الكوري (Curie) المبنية على النشاط الإشعاعي لجرام واحد من الراديوم والبالغ ٣,٧ × ١٠^{١٠} تحللاً في الثانية. أما اليوم فإن الوحدة في النظام المتري هي البكريل (becquerel) والذي يعرف على أنه المعدل الذي يساوي تحللاً واحداً في الثانية.

(٦,٢) العناصر الأساسية للقدرة النووية

Basic Elements of Nuclear Power

يدل مصطلح "القدرة النووية" على استخدام الطاقة النووية بكميات كبيرة. وقد استخدمت القدرة النووية في الأصل لإبراز القوة العسكرية ثم استخدمت فيما بعد لأغراض مدنية لإنتاج الكهرباء على نطاق واسع. وفي الواقع فقد شكل اكتشاف انشطار اليورانيوم عام ١٩٣٨م بداية عصر القدرة النووية، وذلك من خلال بناء أول مفاعل نووي تجريبي عام ١٩٤٢م، ثم من خلال أول استخدام لقنبلة ذرية عام ١٩٤٥م. تزامن تطوير صناعة المفاعلات النووية المدنية التي تنتج الكهرباء مع التطوير العسكري للقنبلة الهيدروجينية والتي بنيت فكرتها على الاندماج النووي الحراري

لنظائر الهيدروجين لتشكل مادة الهيليوم. ويوضح الشكل رقم (٦,٣) إمكانية استخدام هاتين العمليتين. وتظهر في الشكل رقم (٦,٥) مصفوفة تمثل استغلال الطاقة النووية في وقتنا الحاضر.



الشكل رقم (٦,٥). رسم لمصفوفة ثلاثية الأبعاد يبين استغلال الطاقة النووية.

وتمثل المحاور الثلاثة الفواصل بين الانشطار النووي والاندماج النووي من جهة، والاستخدامات المدنية والعسكرية من جهة أخرى، وعنصر الزمن في العمليات النووية من جهة ثالثة. لقد تخلت الولايات المتحدة (وغيرها من الدول ذات الإمكانيات النووية) عن التقنية الخاصة بالاستخدامات السلمية للمتفجرات النووية. لم يحدث التقدم الكبير الذي كنا نتمنى إحرازه لإنشاء مفاعلات نووية حرارية يمكن التحكم فيها، وتظل تقنية الاندماج النووي الحراري غير متوفرة للإنسانية في بحثها عن الطاقة الوفيرة.

(٦,٢,١) الانشطار النووي Nuclear Fission

يؤدي امتزاز (adsorption) نيوترون "حراري" من قبل نواة يورانيوم-٢٣٥ إلى إنتاج نواة يورانيوم-٢٣٦ غير مستقرة بالنسبة لعملية تحلل جسيم ألفا ويمكن أن تنشطر النواة إلى مُنتَجَي انشطار لكل منهما نصف الحجم تقريباً ويتباعدان بعد ذلك عن بعضهما بعضاً بفعل قوة تنافر كولوم. تبين المعادلة الآتية تفاعل الانشطار النووي:

$$^{235}U + n_{th} \Rightarrow {}^{A1}Z_1 + {}^{236-(A1+\nu)}Z_{92-Z1} + \nu\, n + (Q \equiv 200\,MeV) \qquad (٦,٢٠)$$

النيوترونات الحرارية هي نيوترونات فقدت طاقتها الحركية العالية من جراء الاصطدامات في المفاعل مع طاقات ذات درجة حرارة منخفضة (حوالي ١/٤٠ ميجا إ.ف). تبلغ كمية الطاقة المنبعثة من الانشطار ٢٠٠ ميجا إ.ف تقريباً. إن ما يجعل هذه العملية مفيدة كمصدر للطاقة يمكن الاستفادة منه على نطاق واسع هو انبعاث عدد قدره ν من النيوترونات عالية الطاقة، والذي يسمح بدوره بحدوث مزيد من الانشطارات للوقود. وإذا تسبب أكثر من نيوترون من هذه النيوترونات في المزيد من الانشطار فإن معدل الانشطار يتزايد بشكل أسّي وتصبح المنظومة قنبلة ذرية تنفجر خلال أقل من ١ ميكروثانية. أما إذا كانت المنظومة مصممة بحيث تسمح بانبعاث عدد من النيوترونات (عند الكتلة الحرجة للوقود) يكفي لاستمرار الانشطار عند معدل ثابت، فإن المنظومة تصبح مفاعل قدرة نووية يمكن تشغيله لمدة تزيد على ٦٠ عاماً. إن التقدم التقني في المفاعلات النووية الحالية والمفاعلات حديثة التصميم من شأنه أن يمد من عمر عصر الانشطار النووي إلى أن تصبح تقنية الاندماج النووي الحراري ناضجة تماماً.

(٦,٢,٢) الطاقة المتوفرة من وقود اليورانيوم

Available Energy from Uranium Fuel

يتم الحصول على الوقود النووي من ترسبات اليورانيوم بشكله الخام في مواقع متفرقة حول العالم. إن التركيب الكيميائي الأساسي لليورانيوم الخام هو U_3O_8. ينتج

الطن الواحد من اليورانيوم الخام ٠,٨٥ طن من اليورانيوم والذي يحتوي في شكله الطبيعي على اليورانيوم-٢٣٨ بالدرجة الأولى فيما يحتوي على ٠,٧١٪ فقط من اليورانيوم-٢٣٥. يحتوي كل ٠,٨٥ طن من اليورانيوم على ٠,٠٠٥٩ طن من اليورانيوم-٢٣٥. وتحتوي هذه الكمية من اليورانيوم-٢٣٥ على ١,٣٨ × ١٠^{٢٥} ذرة يمكن أن تنتج في مفاعل نووي حوالي ٤٠ مليون كيلووات-ساعة من الكهرباء (على اعتبار أن الطاقة الفورية من كل انشطار هي ١٨٠ ميجا إ.ف تقريباً). أما الكمية الباقية من الطاقة الأصلية البالغة حوالي ٢٠٠ ميجا إ.ف لكل انشطار فإنها تبقى في المنتجات المشعة للانشطار، وهي منتجات ذات قيمة كبيرة وواعدة كمصادر للطاقة النوعية العالية.

إن ما يميز القدرة النووية عن القدرة الناتجة من الوقود الكيميائي هي أن طاقتها النوعية أعلى بكثير ويقصد بذلك كمية الطاقة المنبعثة من كل وحدة كتلة من الوقود. وللمقارنة فإن طناً واحداً من الفحم عالي الجودة (والذي تبلغ قيمته الحرارية ١٢٠٠٠ و.ح.ب/رطل) يمكن أن ينتج حوالي ٢٨٠٠ كيلووات-ساعة من الكهرباء. وعليه فإذا كانت المقارنة مبنية على أساس الطاقة النوعية، فإن طناً واحداً من اليورانيوم الخام يكافئ في إنتاجه للكهرباء حوالي ١٤٠٠٠ طن من الفحم.

هناك طريقتان لقياس مقدار موارد وقود اليورانيوم المتوفرة لإنتاج الكهرباء، إذ يقاس هذا المقدار بناءً على التقنية وبناءً على القرارات السياسية. فالمقدار الذي يقاس بناءً على التقنية يتبع الطرق التي تمت مناقشتها في الفصل الثالث، والتي تعنى بقدرتنا على قياس كمية اليورانيوم الخام الموجودة في قشرة الأرض على أعماق يمكن الوصول إليها. تستخدم المعلومات الحالية عن موارد اليورانيوم الخام [1] التصنيف الآتي (المبني على مستوى الثقة):

RAR = الموارد المؤكدة بشكل معقول (reasonably assured resources)، وهي الموارد المعروفة عن طريق التقنيات الحالية في ضمن نطاق محدد للتكلفة.

EAR = الموارد التقديرية الإضافية (estimated additional resources)، وهي الموارد التي تستنتج قيمها من الترسبات المعروفة باستخدام بيانات الاستكشاف المتوفرة.

EAR-I: مبنية على البيانات الجيولوجية المباشرة.

EAR-II: مبنية على البيانات الجيولوجية غير المباشرة.

SR: الموارد التخمينية (speculative resources)، وهي المبنية على أدلة غير مباشرة وتقديرات جيولوجية استقرائية.

باستخدام نموذج علاقة العرض والطلب، قامت الوكالة الدولية للطاقة الذرية بتوقع الطلب والإنتاج المبني على احتياج السوق من اليورانيوم (بوحدة كيلو طن)، وذلك حتى عام ٢٠٥٠م بناءً على سيناريو الطلب المتوسط، ويلخص الجدول رقم (٦,١) هذه التوقعات.

الجدول رقم (٦,١). التوقعات لعلاقة العرض والطلب لموارد وقود اليورانيوم [1].

السنة	الطلب (كيلوطن يورانيوم)	إنتاج السوق (كيلوطن يورانيوم)
٢٠٠٠م	٦١,٦	٢٨,١
٢٠٢٥م	٩٥,٠	٨١,٩
٢٠٥٠م	١٧٧,٠	١٥٩,٦

وتم حساب نسبة الاحتياطيات إلى الإنتاج (R/P) كدالة في سعر السوق لاحتياطيات اليورانيوم العالمية بناءً على التصنيف الخاص بمستوى الثقة العالي، كما يأتي:

الاحتياطيات

RAR + EAR-I (بسعر ٨٠ دولاراً لكل كيلوجرام يورانيوم) = ٣,١٠٧ ميجاطن يورانيوم

RAR + AR-II (بسعر ١٣٠ دولاراً لكل كيلوجرام يورانيوم) = ٣,٩٣ ميجاطن يورانيوم

الإنتاج (عام ٢٠٠٠م) (بناءً على نسبة استخلاص قدرها ٨٠٪) = ٢٨,١ / ٠,٨ = ٣٥,١ كيلو طن يورانيوم تقريباً.

وقد كانت نسب الاحتياطيات إلى الإنتاج (R/P) الناتجة عن ذلك كما يأتي :

R/P = ٣,١٠٧ / ٠,٠٣٥ = ٨٩ سنة تقريباً (بسعر ٨٠ دولاراً لكل كيلوجرام يورانيوم)

R/P = ٣,٩٣ / ٠,٠٣٥ = ١١٢ سنة تقريباً (بسعر ١٣٠ دولاراً لكل كيلوجرام يورانيوم)

يعتمد مقدار موارد اليورانيوم المتوفرة لإنتاج الكهرباء أيضاً على القرارات السياسية حول الكيفية التي سيستخدم بها اليورانيوم لإنتاج الكهرباء. وتتضمن هذه القرارات خيار اللجوء إلى دورة الوقود التي يستخدم فيها الوقود مرة واحدة (once through) (دورة الوقود المفتوحة) أو اللجوء إلى دورة الوقود التي تتم فيها إعادة معالجته (reprocessing) (دورة الوقود المغلقة). لقد اختارت الولايات المتحدة دورة الوقود المفتوحة بعد قرار حكومة الرئيس كارتر (١٩٧٧ - ١٩٨١م) القاضي بحصر إنتاج الطاقة النووية على المستوى التجاري في الولايات المتحدة في منظومة دورة الوقود التي يستخدم فيها الوقود مرة واحدة بسبب المخاوف من الإرهاب الدولي، إذ أنه يمكن سرقة اليورانيوم المخصّب والبلوتونيوم الذي ينتج مع الوقود في حال استخدام دورة الوقود التي تتم فيها إعادة معالجته. يناقش القسم ٦,٢,٣ الجوانب التقنية لدورتي الوقود هاتين.

(٦,٢,٣) مفاعلات القدرة النووية Nuclear Power Reactors

خلال المراحل الأولى من تطوير تقنية المفاعلات النووية، كانت هناك عدة تصاميم قد أخذت في الاعتبار للاستغلال التجاري لهذه التقنية من ضمنها مفاعل الماء الخفيف، ومفاعل الماء الثقيل، والمفاعل عالي الحرارة الذي يبرد بالغاز، والمفاعل الذي يبرد بالمعادن السائلة (liquid metal)، وتوجد معلومات وافية عن هذه التصاميم في معظم الكتب الدراسية الخاصة بالتقنية النووية (مثل [2,3,4]). كان في بداية القرن الحادي والعشرين ما يزيد على ١٠٠ مفاعل نووي يعمل في الولايات المتحدة وما يزيد

على ٤٤٠ مفاعلاً نووياً في العالم، يبلغ متوسط القدرة الكهربائية لكل منها حوالي ٨٤٠ ميجاووات من الكهرباء. ويوضح الجدول رقم (٦,٢) الأنواع الرئيسة من محطات القدرة النووية التي تعمل حالياً (والمحطات قيد الإنشاء) في العالم، وذلك بناءً على بيانات الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

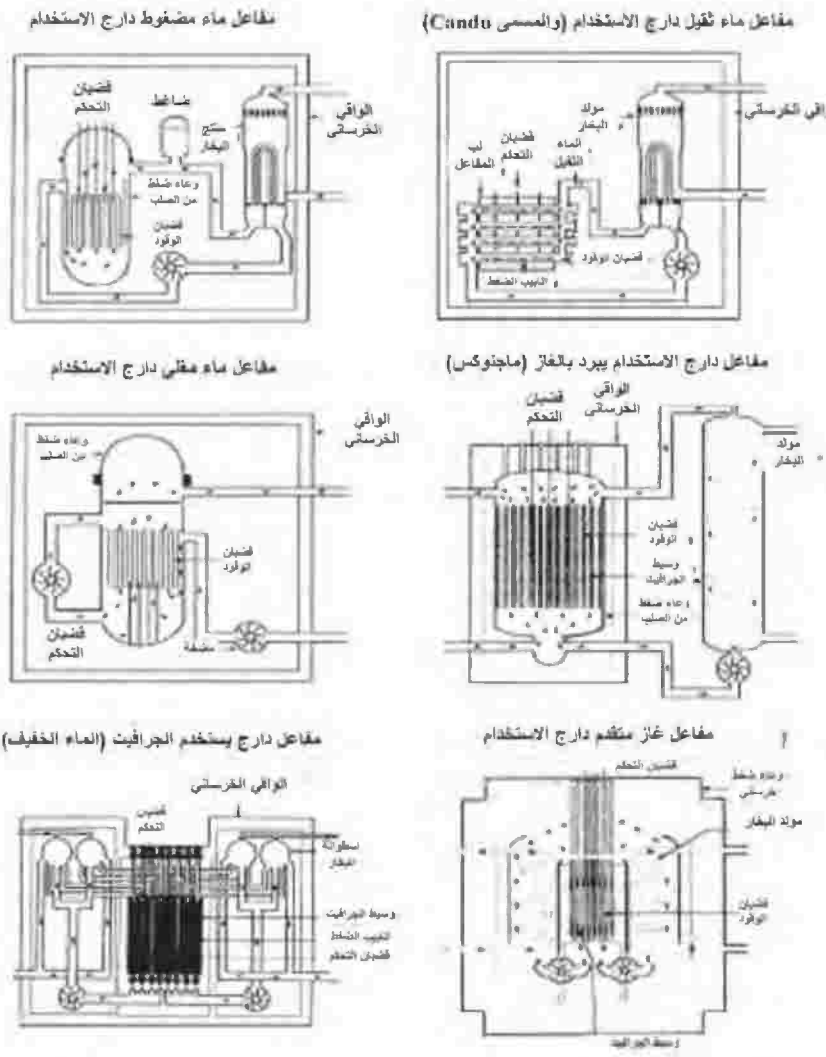
الجدول رقم (٦,٢). محطات القدرة النووية في العالم حسب نوع المفاعل*.

نوع المفاعل	*المفاعلات العاملة*		*مفاعلات في طور البناء*	
	العدد	الطاقة الاستيعابية (جيجاوات كهرباء)	العدد	الطاقة الاستيعابية (جيجاوات كهرباء)
الماء المضغوط	٢٦٧	٢٤١,٢	١١	١٠,٤
الماء المغلي	٩٢	٨٢,٠	٤	٥,٠
مفاعل CANDU	٤٠	٢٠,٥	٧	٢,٦
المبرَّد بالغاز	٢٢	١٠,٧	٠	٠,٠
مفاعل الجرافيت (الماء الخفيف)	١٦	١١,٤	١	٠,٩
سريع التوليد	٣	١,٠	١	٠,٥
الإجمالي	٤٤٠	٣٦٦,٨	٢٤	١٩,٤

* حتى يونيو ٢٠٠٥م. تم تجميع المعلومات من قاعدة بيانات الوكالة الدولية للطاقة الذرية على الإنترنت.

أكثر هذه المفاعلات النووية عدداً (والتي تشكل الأغلبية الساحقة في الولايات المتحدة) هي المفاعلات التي تبرد بالماء الخفيف والتي يستخدم فيها الماء العادي كمادة التبريد التي تحمل الحرارة التي تنتج نووياً في وعاء المفاعل (reactor vessel) إلى التوربين الموصل بالمحول الكهربائي. ويعمل الماء العادي في هذه المفاعلات كذلك كوسيط لإبطاء النيوترونات سريعة الانشطار لتصبح نيوترونات منتجة للطاقة الحرارية. يتم إنشاء مفاعلات الماء الخفيف على أحد نوعين: مفاعلات الماء المغلي (boiling water reactor)

ومفاعلات الماء المضغوط (pressurized water reactor). وتبين الرسوم التوضيحية في الشكل رقم (٦,٦) الفروق الهندسية بين التصميمين الحاليين للمفاعلات.



الشكل رقم (٦,٦). رسوم توضيحية لأنواع المفاعلات النووية المستخدمة حالياً (المصدر: الجمعية النووية العالمية).

ويُعد مفاعل الماء المغلي ومفاعل الماء المضغوط التصميمين الأكثر شيوعاً. في حالة مفاعل الماء المغلي، يسمح لماء التبريد بالغليان في وعاء المفاعل ثم يتدفق البخار من وعاء المفاعل إلى التوربين الموصل بالمحول الكهربائي. أما في حالة مفاعل الماء المضغوط فيتم ضغط ماء التبريد لمنع حدوث الغليان في وعاء المفاعل ومن ثم ينقل الماء السائل فائق الحرارة إلى مبادل حراري داخل وعاء المفاعل، حيث ينتج البخار الذي يحرك التوربين والمحول الكهربائي.

وأنواع المفاعلات الأخرى المذكورة في الجدول رقم (٦,٢) هي مفاعل الماء الثقيل (HPWR) (والذي يسمى مفاعل CANDU، وهو اختصار لليورانيوم-ديوتريوم-الكندي Canadian-deurtrium-uranium) الذي يستخدم اليورانيوم الطبيعي (UO_2) كوقود ويستخدم الماء الثقيل (HDO وD_2O) كمادة تبريد وكوسيط، وكذلك المفاعل الذي يبرد بالغاز (GCR) والذي يستخدم غازات مثل الهيليوم وثاني أكسيد الكربون كمادة تبريد والجرافيت كوسيط، ومفاعل الماء الخفيف روسي التصميم (RBMK) والذي يستخدم الماء كمادة تبريد والجرافيت كوسيط، والمفاعل سريع التوليد (FBR) والذي يستخدم معدناً سائلاً مثل الصوديوم كمادة التبريد ولا يتطلب وسيطاً [حيث إن انشطار اليورانيوم المخصب وإنتاج البلوتونيوم (Pu) من خلال أسر النيوترونات يحدث باستخدام نيوترونات سريعة].

إن استغلال الطاقة النووية لإنتاج القدرة الكهربائية آخذ في النمو على مستوى العالم في كثير من الدول. يقدم الجدول رقم (٦,٣) ملخصاً للتوزيع العالمي لمنشآت القدرة النووية [6]. وينقسم هذا الجدول إلى قسمين، حيث يورد القسم الأول الدول العشر الأكثر اعتماداً على إمدادات الكهرباء المنتجة نووياً، بينما يورد القسم الثاني الدول العشر الكبرى من ناحية القدرة الإنتاجية القائمة.

الجدول رقم (٦,٣). (أ) الكهرباء المنتجة نووياً حسب نسبتها من الإنتاج الكلي للكهرباء*.

الدولة	الكهرباء المنتجة نووياً (تيراوات-ساعة)	النسبة من الإنتاج الكلي للكهرباء (٪)	عدد المفاعلات	الطاقة الاستيعابية الفعلية (جيجاوات كهرباء)
١. ليثوانيا	١٤,٣	٧٩,٩	٢	٢,٣٧٠
٢. فرنسا	٤٢٠,٧	٧٧,٧	٥٩	٦٣,٤٧٣
٣. سلوفاكيا	١٧,٩	٥٧,٤	٦	٢,٤٧٢
٤. بلجيكا	٤٤,٦	٥٥,٤	٧	٥,٧٢٨
٥. السويد	٦٥,٥	٤٩,٦	١١	٩,٤٢٩
٦. أوكرانيا	٧٦,٧	٤٥,٩	١٣	١١,٢٦٨
٧. سلوفينيا	٥,٠	٤٠,٥	١	٠,٦٧٦
٨. كوريا الجنوبية	١٢٣,٣	٤٠,٠	١٩	١٥,٨٨٠
٩. سويسرا	٢٥,٩	٣٩,٧	٥	٣,٢٢٠
١٠. بلغاريا	١٦,٠	٣٧,٩	٤	٢,٧٢٢
١١-٣١ بقية العالم	١٧١٤,٨	غير متوفرة	٣١٤	٢٤٥,٨٩٧
الإجمالي	٢٥٢٤,٧	١٦,٠	٤٤١	٣٦٣,١٣٥

الجدول رقم (٦,٣). (ب) الكهرباء المنتجة نووياً حسب الطاقة الاستيعابية الموجودة فعلياً**.

الدولة	الطاقة الاستيعابية الفعلية (جيجاوات كهرباء)	الكهرباء المنتجة نووياً (تيراوات–ساعة)	النسبة من الإنتاج الكلي للكهرباء (٪)	العدد الكلي للمفاعلات
١. الولايات المتحدة	٩٧,٤٨٥	٧٦٥,٧	١٩,٩	١٠٣
٢. فرنسا	٦٣,٤٧٣	٤٢٠,٧	٧٧,٧	٥٩
٣. اليابان	٤٥,٥٢١	٢٣٠,٨	٢٥,٠	٥٤
٤. روسيا	٢٠,٧٩٣	١٣٨,٤	١٦,٥	٣٠
٥. ألمانيا	٢٠,٦٤٣	١٥٧,٤	٢٨,١	١٨
٦. كوريا الجنوبية	١٥,٨٨٠	١٢٣,٣	٤٠,٠	١٩
٧. كندا	١٢,٠٨٠	٧٠,٣	١٢,٥	١٧
٨. المملكة المتحدة	١٢,٠٤٨	٨٥,٣	٢٣,٧	٢٧
٩. الصين	١١,٤٧١	٧٩,٠	ملاحظة (٢)	١٥
١٠. أوكرانيا	١١,٢٦٨	٧٦,٧	٤٥,٩	١٣
١١–٣١ بقية العالم	٥٢,٤٧٣	٣٧٩,١	غير متوفرة	٨٦
الإجمالي	٣٦٣,١٣٥	٢٥٢٤,٧	١٦,٠	٤٤١

* حسب المعلومات المتوفرة حتى ٣٠ مايو ٢٠٠٤م، حيث صنفت الدول العشر الأولى حسب أعلى نسبة من إنتاج الكهرباء نووياً في الجدول (أ) وصنفت الدول العشر الأولى حسب أعلى طاقة استيعابية فعلية في الجدول (ب).

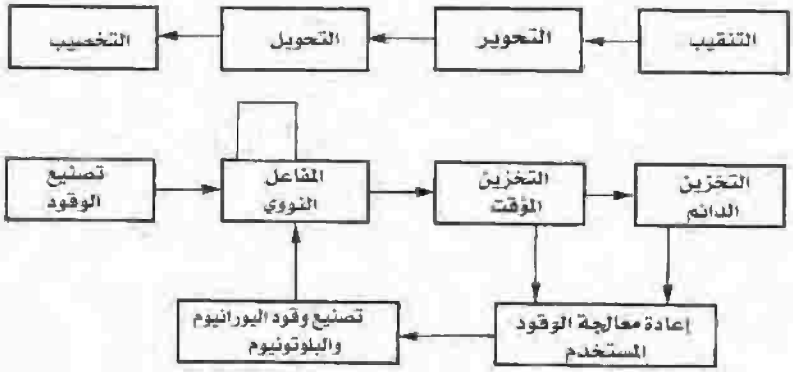
** تسعة مفاعلات على أراضي الصين الشعبية وستة مفاعلات على أراضي تايوان.

المصدر: الجمعية النووية العالمية، *دليل الجيب ٢٠٠٤ م*، أغسطس ٢٠٠٤م.

(٦,٢,٤) دورة وقود اليورانيوم التي يستخدم فيها الماء الخفيف

The Light-Water Uranium Fuel Cycle

يضم الشكل رقم (٦,٧) *نموذجاً صندوقياً* للدورة الكاملة للوقود في مفاعلات الماء الخفيف. بالنسبة للجزء الأمامي من النموذج (مرحلة تصنيع قضبان الوقود لوعاء المفاعل النووي) فإن هناك تشابهاً كبيراً بين الدورتين المفتوحة والمغلقة، بينما ينتج عن الجزء الخلفي من النموذج (المرحلة التي تتبع التخلص من قضبان الوقود المستهلكة) الدورة المغلقة.



الشكل رقم (٦,٧). دورة وقود اليورانيوم لمفاعلات الماء الخفيف النووية.

تنتهي دورة الوقود المفتوحة عند السهم المتجه من مرحلة "التخزين المؤقت" إلى مرحلة "التخزين الدائم". أما دورة الوقود المغلقة فإنها تستمر مع السهم المتجه إلى مرحلة "إعادة معالجة الوقود". ولو نقل جيلنا الحالي قضبان الوقود المستهلك لتخزن تخزيناً "دائماً" فإن من المرجح أن تقوم أجيال المستقبل بالبحث عن تلك القضبان طلباً للطاقة التي يحتاجونها وستكون تكلفة بحثهم في الغالب طائلة.

تشتمل الدورة الكاملة لوقود اليورانيوم على العمليات الآتية:

الخطوة في الدورة	شكل الوقود
التنقيب عن اليورانيوم الخام وتحويره	U_3O_8 (أو ما يسمى الكعك الأصفر)
التحويل الكيميائي	$UF_6 \leftarrow U_3O_8$ (مادة متطايرة)
التخصيب	^{235}U ٪2-3 $\leftarrow$ ^{235}U ٪0.7
صنع الوقود	$UO_2 \leftarrow UF_6$ (في قضبان مغلفة ذات درجة حرارة عالية)
الانشطار	كمية انشطار ^{235}U في قضبان الوقود
إعادة المعالجة	تدوير اليورانيوم والبلوتونيوم ومنتجات الانشطار
التخلص من النفايات النووية	عدم استعمال مصادر الطاقة النوعية العالية

(٦,٢,٥) الجيل الرابع من المفاعلات النووية Generation IV Nuclear Reactors

تسمى المفاعلات الواردة بالقسم (٦,٢,٣) مفاعلات الجيل الثاني والتي أخذت في الاعتبار الدروس المستفادة من الجيل الأول من تصاميم المفاعل النووي. وتسير الأبحاث قدماً على مستوى العالم في مجال تصميم المفاعلات المتقدمة (المسماة مفاعلات الجيل الثالث)، وذلك للاستخدام قريب المدى (٢٠١٠ - ٢٠٣٠م). بالإضافة إلى ذلك، فقد شكلت ١٠ دول منذ عام ٢٠٠٠م المنتدى الدولي للجيل الرابع (GIF) (Generation IV International Forum) للتطلع إلى فترة ما بعد عام ٢٠٣٠م، وذلك بالقيام بمزيد من التطوير في تصاميم المفاعلات النووية، بحيث تكون مؤمّنة وآمنة وذات جدوى اقتصادية لتلبي الزيادة المتوقعة في الطلب على الكهرباء بشكل مستدام. ويمكن الاطلاع على استعراض لوضع جهود المنتدى الدولي للجيل الرابع من خلال موقع الجمعية النووية العالمية (World Nuclear Association): www.world-nuclear.org/.

يوضح الجدول رقم (٦,٤) المستقى من هذا المصدر الخصائص الأساسية للمنظومات الست التي وقع عليها الاختيار ليوضع لها تصميم تفصيلي، حيث يُحَدّد نوع المفاعل من خلال منظومة التبريد التي تحقق نطاق درجة الحرارة المذكورة. وتتفاوت طاقة النيوترونات من السريعة (التي يتم انبعاثها عند حدوث الانشطار) إلى النيوترونات فويق الحرارية (والتي يتم إبطاؤها بشكل جزئي) إلى النيوترونات الحرارية (المستخدمة في الجيل الثاني من مفاعلات الماء الخفيف). تعمل أربعة من التصاميم الستة عند درجات حرارة عالية بما يكفي لجعل استخدام هذه المفاعلات ممكناً في عملية الفصل الكيميائي الحراري للماء لإنتاج الهيدروجين (H) (انظر الفصل الثامن) وكذلك الكهرباء (E).

الجدول رقم (٦,٤). عرض شامل لتصاميم الجيل الرابع من المفاعلات النووية [7].

نوع المفاعل	مادة التبريد	طاقة النيوترون	درجة الحرارة (مئوية)	الحجم (ميجاوات كهرباء)	الاستخدامات المحتملة
المبرد بالغاز	الهيليوم	سريعة	٨٥٠	٢٨٨	E+H
المبرد بالرصاص	الرصاص-البزموث	سريعة	٥٥٠-٨٠٠	٣٠٠-٤٠٠، ١٢٠٠	E+H
الملح المذاب	أملاح الفلورايد	فويق الحرارية	٧٠٠-٨٠٠	١٠٠٠	E+H
المبرد بالصوديوم	الصوديوم	سريعة	٥٥٠	١٥٠-٥٠٠، ٥٠٠-١٥٠٠	E
ذو درجات الحرارة فوق الحرجة	الماء	أي من النوعين	عالية جداً	١٥٠٠	E
المبرد بالغاز عند درجات حرارة عالية جداً	الهيليوم	حرارية	عالية	٢٥٠	E+H

(٦,٢,٦) السلامة النووية Nuclear Safety

ظلت سلامة المفاعلات النووية قضية مثيرة للجدل طوال السنوات الخمسين الماضية وهي الفترة التي تمثل تاريخ مفاعلات القدرة النووية العاملة حول العالم. وقد كانت المخاوف الرئيسة التي أشار لها المناهضون لاستخدام الطاقة النووية بغرض إنتاج الكهرباء كما يأتي:

١- انفجار المفاعل كما تنفجر قنبلة ذرية.

٢- إذا تزامن حادث نقص مادة التبريد (LOCA) مع توقف منظومة الطوارئ لتبريد لب المفاعل (ECCS) فإن ذلك سيؤدي إلى انصهار المفاعل.

٣- حدوث تسرب ضخم للمواد المشعة في حالات الحوادث.

٤- التسرب المستمر للمواد المشعة تحت ظروف التشغيل الطبيعية.

٥- ستشكل الحرارة الناتجة من عملية تبريد المفاعل والتي يتم التخلص منها خطراً بيئياً.

٦- سيشكل نقل المواد المشعة خطراً.

٧- سيتمكن الإرهابيون والدول المارقة من الحصول على البلوتونيوم (Pu) ووقود اليورانيوم المخصب.

٨- ستفشل عملية التخلص من النفايات المشعة فتشكل بذلك خطراً بيئياً.

لا تزال هذه المخاوف قائمة بالرغم من اعتمادية المفاعلات النووية وبالرغم من الجهود الخاصة بوضع قوانين السلامة التي تبذلها الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) على العالم وتبذلها وزارة الطاقة الأمريكية (DOE) في الولايات المتحدة [حيث تتولى المفوضية الأمريكية للقوانين النووية تنفيذ تلك القوانين]. وتتضمن السياسات الخاصة بالسلامة:

١- تقييم جميع الأنواع الممكنة من الحوادث وخطورتها.

٢- اشتراط تطبيق احترازات أمنية مع الإشراف على بناء المفاعلات وتشغيلها لمنع حصول الحوادث.

٣- تقييم الطرق التي يمكن الاعتماد عليها للاحتواء وللحفاظ على أمن مواقع المفاعلات.

٤- الفحص المستمر للتصاميم والبناء والتشغيل والترخيص والالتزام بتطبيق الأنظمة.

٥- القيام بأبحاث مساندة في مجال السلامة ويعمل برامج اختبار.

(٦,٢,٧) النفايات النووية Nuclear Waste

بقيت النفايات النووية (وهي أشهر عبارة تناقض نفسها في العالم (oxymoron)) موضع بحث تقني واجتماعي لمدة تزيد عن خمسين عاماً. قد تعتبر أجيال المستقبل الخوف من استخدام الوقود النووي الذي يعاد استخدامه والخوف من منتجات الانشطار المشعة ذات الطاقة النوعية العالية أموراً غير منطقية. وتعني كلمة oxymoron "مجموعة من الكلمات المتناقضة المتنافرة"، أما كلمة *النووية* فتعني "ما يتعلق بالطاقة النووية أو استغلالها"، بينما تعني كلمة *النفايات* "ما يتم التخلص منه بسبب انعدام قيمته أو تلفه أو لانعدام فائدته". وعليه سيعتبر النظر إلى المواد المشعة (الطاقة النووية)، التي تحتوي طاقة نوعية أكبر بمليون مرة من أنواع الوقود الكيميائي، على أنها نفايات حماقة كبيرة في المستقبل، عندما تصبح موارد الطاقة من الوقود الأحفوري شحيحة وفي الوقت الذي ستكون فيه موارد الطاقة المتجددة غير قادرة على تلبية الطلب على الطاقة من قبل تعداد سكان عالمي دائم التزايد.

تسمى كمية الوقود النووي المستهلك في مفاعل نووي خلال دورة تشغيل واحدة *الكمية المنشطرة* (burnup) ويعبر عنها بوحدات ميجاوات-يوم لكل طن متري. وإذا أخذنا في الاعتبار مفاعلاً دارج الاستخدام يستعمل الماء الخفيف وقدرته ١٠٠٠ ميجاوات من الكهرباء ويحتوي على ١٠٠ طن متري من الوقود ويعمل بكفاءة تحويل (من طاقة حرارية إلى طاقة كهربائية) مقدارها ٣٣,٣٪ لمدة ثلاث سنوات (١١٠٠ يوم)، فإن الكمية المحترقة ستكون ٣٠٠٠ (ميجاواط كهرباء) × ١١٠٠ (يوم) / ١٠٠ (متر طني) = ٣٣٠٠٠ ميجاوات-يوم لكل طن متري. وسوف تستهلك هذه الكمية

المحترقة ٣,٣ طناً متريا من اليورانيوم-٢٣٥ ، أي ما يعادل ٣,٣٪ من الوقود الموضوع في لب المفاعل. وسيحتوي الوقود المستهلك، "الذي يعتبر المجتمع أنه لم يعد نافعاً"، على ٩٦,٧ طناً متريا من وقود نووي تمت معالجته بكلفة عالية وعلى حوالي ١٠ إلى ١٢ كيلوجراماً من البلوتونيوم القابل للانشطار، وحوالي ٣,٣ طناً متريا من منتجات الانشطار المشعة ذات الطاقة العالية.

ماذا عسانا أن نفعل بالوقود المستهلك (والذي يعد من النفايات)؟ هنالك ثلاثة خيارات:

١- يحفظ الوقود اليوم (وكما هو الحال على مدى السنوات الخمسين الماضية) في مواقع المفاعلات النووية "ليرحل ويتحلل".

٢- سيتم في الغد (ربما مع حلول عام ٢٠١٢م) تخزين الوقود في مواقع مؤقتة أو دائمة للتخلص منه مثل مستودع جبل يوكا الفيدرالي (Yuca Mountain Federal Repository) في ولاية نيفادا والمحطة التجريبية لعزل النفايات (Waste Isolation Pilot Plant, WIPP) في ولاية نيومكسيكو.

٣- سيتم في وقت ما في المستقبل إعادة معالجة الوقود لاستخلاص الوقود المستهلك ومنتجات الانشطار المشعة ذات الطاقة العالية لاستخدامها في اقتصاد المستقبل المعتمد على إعادة التدوير.

(٦,٣) مفاعلات أوكلو النووية الطبيعية على الأرض
The Oklo Natural Nuclear Reactors on Earth

تم العثور في عام ١٩٧٢م على اليورانيوم الخام في ترسبات في منطقة أوكلو في دولة الجابون بأفريقيا بتركيب نظائري غير معهود أدى للتكهن بأن تفاعلات انشطارية سلسلية تلقائية قد حدثت على الأرض في الماضي البعيد. وبناءً على الاتفاقات الدولية، فقد تم نقل هذه الملاحظات إلى الوكالة الدولية للطاقة الذرية. وقد أدت تلك

الاستكشافات إلى الإدراك بأن تفاعلات نووية طبيعية حدثت على الأرض قبل حوالي ملياري سنة (على الأقل في منطقة أوكلو) واستمرت لحوالي ٥٠٠ ألف سنة.

كان هناك سؤالان علميان مهمان يحتاجان إلى إجابة، هما:

١- كيف أمكن حدوث الانشطار النووي بشكل طبيعي قبل حوالي ملياري سنة؟

٢- كيف يمكننا في عام ١٩٧٥م أن نجزم بأن هذا الانشطار قد حدث بالفعل؟

تم تقييم هذين السؤالين في ملتقيين علميين دوليين للوكالة الدولية للطاقة الذرية [8,9]، كما تشير المراجع [3,5,6,7] المذكورة في نهاية هذا الفصل. وهناك مصادر عدة متوفرة على شبكة الإنترنت لمزيد من المعلومات حول مفاعلات أوكلو النووية.

وقد تضمنت الإجابة على السؤال الأول جوانب تقنية المفاعلات النووية وهي التخصيب والوصول إلى المرحلة الحرجة (criticality) والوسط (moderation) والسموم [10]. بالنسبة للتخصيب، فبما أن عمر النصف لعنصر U^{235} أقل من عمر النصف لعنصر اليورانيوم-٢٣٨ فإن نسبة اليورانيوم-٢٣٥ في اليورانيوم والبالغة ٠,٧١٪ قبل ملياري سنة كانت في نفس النطاق الخاص بمفاعلات الماء الخفيف وهو أكثر من ٢٪. أما بالنسبة للوصول إلى المرحلة الحرجة، فإن كميات من أملاح اليورانيوم ذات تركيز عالٍ بما يكفي ترسبت في مجاري الأنهار بحيث تشكل كتلة حرجة لحدوث انشطار نووي مستدام. وبالنسبة للوساطة فقد أدى الماء دور الوسيط الذي يقوم به اليوم في المفاعلات النووية لتهدئة النيوترونات (أي لتقليل الطاقة المنبعثة من النيوترونات عالية الطاقة من جراء التصادم دون أن تمتصها نوى اليورانيوم-٢٣٥ القريبة وتأسرها). وبالنسبة للسموم، فإن النويدات الأخرى التي يمكن أن تمتص النيوترونات بشكل أسرع من اليورانيوم، مثل الكادميوم، والتي تستخدم كقضبان للتحكم في المفاعلات النووية الحديثة للتحكم في معدل الانشطار لم تكن موجودة في خام اليورانيوم. لذلك فقد تحققت الشروط الأربعة اللازمة لاستدامة تفاعلات الانشطار على مدى الفترة المقدرة بخمسمائة ألف سنة من الانشطار النووي الطبيعي في منطقة أوكلو.

أما السؤال الثاني فقد تضمنت الإجابة عليه جانب التغير في التركيب النظائري لليورانيوم الخام في منطقة أوكلو وجانب الديمومة الجيولوجية لموقع المفاعل الطبيعي وجانب قياسات المنتجات النهائية المستقرة (غير المشعة) لسلاسل تحلل منتج الانشطار. لقد أعطت المؤشرات المبكرة التي دلت على أن النسبة النظائرية لعنصر اليورانيوم-٢٣٥ كانت أقل بكثير من ٠,٧١٪، تلك المؤشرات مصداقية لإمكانية أن يكون استهلاك اليورانيوم-٢٣٥ قد حدث في ذلك الزمان. وقد أوضح الاستكشاف الجيولوجي المستفيض للموقع أن مكامن خام اليورانيوم لم يحصل فيها هبوط عميق مع مرور الزمن مما مكن من اكتشاف ترسبات الخام. لقد استطاع العديد من العلماء حول العالم أن يقيسوا بسهولة تخصيب النظائر الناتجة عن الانشطار بفعل عدة تحللات بينا نتجت بدورها عن منتجات الانشطار المشعة وتمكن العلماء من مقارنتها بالتركيب النظائري "الاعتيادي" لتلك العناصر.

ويمكن أن يطرح سؤال عملي ثالث: ماذا يعني كل ذلك لنا اليوم؟ ذلك سؤال يتعلق بتطور التاريخ الطبيعي وأهميته في التخلص من النفايات النووية في عصرنا الحاضر. في نظر علماء التاريخ الطبيعي، فإن ظاهرة الانبعاث الطبيعي لحوالي ١٠٠ مليار كيلووات-ساعة من الطاقة النووية في مكان صغير عندما كان عمر الأرض هو حوالي نصف عمرها اليوم كانت ولا شك أمراً ذا أهمية بيئية. وإذا نظرنا إلى الأولويات في عملية التخلص من النفايات النووية، فإن الحالة التي حفظ فيها موقع "المفاعل النووي الأحفوري" في منطقة أوكلو ستزيد دون شك من الإيمان بقدرة التكوينات الجيولوجية على تخزين النفايات النووية لمليارات السنين.

(٦,٤) الاندماج النووي الحراري
Thermonuclear Fusion

يختتم هذا الفصل بنظرة سريعة إلى إمكانية وجود طاقة شمسية حقيقية على الأرض، ونعني بذلك استخدام طريقة الشمس في إنتاج الطاقة النووية بشكل مستمر

بالتفاعلات النووية الحرارية باستخدام نظائر للهيدروجين. فكما أن معادلة آينشتاين تبين تكافؤ الكتلة والطاقة فإن الأساس لإمكانية حدوث التفاعلات النووية الحرارية يأتي من معادلة بولتزمان (Boltzmann) التي تربط الطاقة (E) (بوحدة إلكترون فولت) بدرجة الحرارة (T) (بوحدة درجة كيلفن) كما يأتي :

$$E = kT \qquad (٦,٢١)$$

حيث إن :

k هو ثابت بولتزمان = ٨,٦٢ × ١٠$^{-٥}$ إ.ف / درجة كيلفن.

تمتلك ذرات الهيدروجين الغازي (H_2) عند درجة حرارة الغرفة T = ٢٩٨ درجة كيلفن طاقة حرارية يبلغ متوسطها الإحصائي حوالي ٤٠/١ إ.ف. أما عند درجة حرارة الشمس T = ١٥ × ١٠^{٦} درجة كيلفن، فيبلغ متوسط طاقة الذرات الشمسية حوالي ١,٣ كيلو إ.ف.

والمصدر العام لطاقة الشمس هو اندماج نوى الهيدروجين الثقيل (ديوتريوم، ^2H) في التفاعل الآتي :

$$^2H + {}^2H \Rightarrow {}^4He + BE(\gamma) \qquad (٦,٢٢)$$

لتشكل نوى هيليوم-٤ من جراء انبعاث طاقة الترابط على شكل إشعاع جاما. من الصعب جداً إنتاج هذا التفاعل على الأرض. التفاعل الذي يعتبر واعداً بشكل أكبر والذي تم تحقيقه على الأرض على شكل القنبلة الهيدروجينية واستمر لمدة تقل عن ١ ميكروثانية هو التفاعل بين نظيري الهيدروجين الديوتريوم والتريتيوم :

$$^2H + {}^3H \Rightarrow {}^4He + {}^1n + Q(17.6\,MeV) \qquad (٦,٢٣)$$

يتضمن التقدم التقني الكبير اللازم لإطالة عمر "مفاعل الاندماج النووي الحراري"، مدة تقل عن ١ ميكروثانية إلى أكثر من ٥٠ سنة، قضية درجة حرارة الاحتراق الخاصة بالعملية، إذ يرتفع معدل التفاعلات النووية الحرارية بسرعة مع ارتفاع درجة الحرارة فوق درجة حرارة حرجة (أو درجة حرارة اشتعال) (T_c) تقابل الحد الأدنى للطاقة.

وبالنسبة لتفاعل الديوتريوم-الديوتريوم فتبلغ الطاقة اللازمة للاشتعال حوالي ٢٠ كيلو إ.ف وهي تقابل درجة حرارة حرجة T_c تبلغ $١٠^{٨}$ درجة كيلفن تقريباً. أما بالنسبة لتفاعل الديوتريوم-التريتيوم فتبلغ درجة الحرارة الحرجة T_c ١٠ كيلو إ.ف تقريباً والتي يعتبر الوصول إليها على الأرض أسهل بكثير، بالرغم من أنها تظل مشكلة تقنية صعبة تواجه الإنتاج المستدام للطاقة. لذا، فلو تم تسخين خليط من الديوتريوم والتريتيوم إلى درجة حرارة $T > ١٠$ كيلو إ.ف تقريباً، فإن معدل التفاعلات سيزداد، وبالإضافة إلى ذلك فإنه:

إذا تماسكت الكتلة بحيث: $dE/dt \longleftarrow \infty$، فإنه سينتج عن ذلك قنبلة هيدروجينية متفجرة.

وإذا تم التحكم في الكتلة بحيث: $dE/dt \longleftarrow$ صفر فإنه سينتج عن ذلك مفاعل قدرة يعمل بالاندماج الحراري النووي

بدأ التقدم العلمي الكبير اللازم للقيام بذلك يجد طريقه الآن للوصول إلى تفاعلات نووية حرارية يمكن التحكم فيها، إذ أن الديوتريوم يكون عند درجة حرارة $١٠^{٧}$ درجة كيلفن على شكل بلازما، $^{2}H \Rightarrow d^{+} + e^{-}$، فإذا جُرِّدت بلازما الديوتريوم من الإلكترونات فإنه يمكن إبقاؤها في "قارورة" مغناطيسية. يمكننا التحكم في التفاعلات الآتية من خلال عدة تقنيات محتملة:

١- الاندماج المغناطيسي : بحيث تتم المحافظة على درجة الحرارة T مساوية تماماً لدرجة الحرارة الحرجة T_c (وهو أمر صعب التحقيق).

٢- الاندماج بالليزر : بحيث يتم الحد من تركيز d^+ في "المفاعل" (وهو أمر تحقيقه أسهل).

٣- السماح بحدوث "انفجارات مصغرة" في المفاعل (وهو أمر صعب التحقيق).

وقد استطاعت الأبحاث حتى الآن أن تقترب من تحقيق المعايير اللازمة للاندماج المغناطيسي الخاصة بالحد النظري لحاصل ضرب التركيز والطاقة والزمن للديوتريوم (nvt) والذي ينبغي أن يزيد عن $١٠^{١٤}$ أيون-ثانية. وتستطيع أجهزة الاحتواء المغناطيسي اليوم الوصول إلى (nvt) أعلى من ٤×١٠^{١٢} أيون-ثانية. وعليه فإن لنا أن نأمل في توصل الإنسانية إلى مصدر الطاقة الأقصى وهو الطاقة الشمسية الحقيقية على الأرض قبل أن ينضب الوقود النووي الانشطاري.

(٦,٥) الخلاصة

Summary

قدم هذا الفصل عرضاً موجزاً للطاقة النووية باستخدام *نموذج هندسي* لنواة الذرة والذي يتكون من بروتونات ونيوترونات محاطة بإلكترونات تدور حول النواة في مدارات. ويُعد هذا النموذج كافياً لإدراك مفهوم طاقة الترابط النووية وعلاقتها باكتشاف الطاقة النووية في القرن العشرين بشكليها : الانشطار النووي، والاندماج النووي. وقد وضع هذا الفصل تصوراً للطاقة النووية في حدود استخداماتها المدنية كمصدر للطاقة، تماماً كما نَصِف المطرقة بأنها أداة نافعة قادرة على طَرق المسامير في الجدران دون الإشارة إلى أن المطرقة قادرة على أن تحدث شرخاً في الجمجمة. وشرح هذا الفصل أساسيات مفاعلات القدرة النووية مع التعليق على

قضيتي السلامة النووية والنفايات النووية. واختتم الفصل بمناقشة وجود مفاعلات نووية طبيعية في فترة ما قبل التاريخ في أفريقيا والهدف المستقبلي إلى الوصول للاندماج النووي الحراري لنتمكن من إنتاج الطاقة الشمسية على الأرض كما تنتج في الشمس نفسها.

المراجع References

[1] International Atomic Energy Agency. *Analysis of Uranium Supply to 2050.* STI/PUB/1104. Vienna: IAEA, 2001

[2] R. A. Knief, *Nuclear Energy Technology*. New York: McGraw-Hill, 1981.

[3] R. L. Garwin and G. Charpak, *Megawatts and Megatons.* Chicago: University of Chicago Press, 2002.

[4] S. W. Heaberlin, *A Case for Nuclear-Generated Electricity.* Columbus, OH: Battelle Press, 2004.

[5] World Nuclear Association, *World Power Reactors*. Information Series, London WNA, September 2004.

[6] World Nuclear Association, *WNA Pocket Guide-2004*. August 2004.

[7] World Nuclear Association, *Generation IV Nuclear Reactors*. Information Series, London WNA, April 2005.

[8] International Atomic Energy Agency, *The OKLO Phenomenon*, STI/PUB/405. Vienna: IAEA, 1975.

[9] International Atomic Energy Agency, *Natural Fission Reactors*, STI/PUB/475. Vienna: IAEA, 1978.

[10] G. A. Cowan, "A Natural Fission Reactor." *Scientific American* 235: 36, 1976.