الفصل الثاني

1 ـ طاقة الوقود النووي:

من الوحدات الهامة في قياس الطاقة النووية وحدة تعرف باسم مليون إلكترون ڤولت (Mev) وهي تساوي مليون مرة قدرة الإلكترون ڤولت.

والإلكترون ڤولت يساوي مقدار الشغل المبذول في نقل شحنة إلكترون بين نقطتين في مجال كهربائي فرق الجهد بينهما يساوي واحد ڤولت.

وهكذا فإن مقدار الشغل = فرق الجهد × كمية الكهرباء

شحنة الإلكترون = $1,6 \times 10^{-19}$ كلوم (أمبير. ثانية)

وهكذا الإلكترون ڤولت = $1 \times 1,6 \times 10^{-19} = 1,6 \times 10^{-19}$ جول

ونحصل على أن المليون إلكترون ڤولت (Mev) = $10^{6} \times 1,6 \times 10^{-19} = 1,6 \times 10^{-13}$ جول

وتظهر الطاقة النووية بتحول المادة إلى طاقة في المواد ذات النشاط الإشعاعي، وبمعرفة النقص في كتلة المواد المشعّة يمكن حساب الطاقة بتطبيق معادلة أينشتين.

الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء.

إن وحدة الكتل الذرّية يساوي 1/16 من وزن ذرّة الأكسجين

ذرّة الأكسجين = $1,66 \times 10^{-24}$ من الجرام.

واحد وحدة ذرّية تكافىء 931 مليون إلكترون ڤولت.

لنحسب مثلاً كتلة المادة اللازمة للحصول على 40 مليون كيلو. وات. ساعة. إذا فرضنا إمكان تحويل تلك الكتلة تحويلاً كاملاً إلى طاقة وما مقدار الطاقة محسوبة بالمليون إلكترون ڤولت؟

$$\text{الكتلة (بالجرام)} = \frac{\text{الطاقة (إرج)}}{\text{مربع سرعة الضوء (سم/ثانية)}}$$

$$\text{الكتلة} = \frac{40 \times 10^{6} \times (3600 \times 1000) \times 10^{7}}{(3 \times 10^{10})^{2}}$$

(كيلو. وات. ساعة = 1000 × 3600 وات. ثانية)

الوات. ثانية = جول واحد

الجول = 10^{7} (إرج)

سرعة الضوء = (3×10^{10}) سم/ثانية

الكتلة اللازمة = 1,6 جم

(40×10^{6}) كيلو. وات. ساعة = $(40 \times 10^{6} \times 1000 \times 3600)$ وات. ثانية = $(40 \times 10^{6} \times 1000 \times 3600)$ جول

المليون إلكترون ڤولت = $(1,6 \times 10^{-13})$ جول (تم حسابها سابقاً)

وهكذا 40 مليون كيلو. وات. ساعة =

$$\frac{40 \times 10^{6} \times 1000 \times 3600}{1,6 \times 10^{-13}} = (9 \times 10^{26}) \text{ مليون إلكترون ڤولت}$$

وهكذا

40 مليون كيلو. وات. ساعة = (9×10^{26}) مليون إلكترون فولت = 1,6 جم مادة مشعّة.

إن هذه الحسابات هي مجرد حسابات فيزيائية نظرية. أما إذا نظرنا تقنياً وهندسياً إلى المسألة وأخذنا بعين الاعتبار العوامل الكثيرة التي تدخل في عمليات تحويل الطاقة، وإذا أخذنا تدني كفاءة الأجهزة والعناصر التي تدخل في تكوين المفاعل النووي. فإننا نُقْدِرُ الوقود النووي اللازم في المحطة النووية على النحو التالي:

كيلوغرام واحد من اليورانيوم يحرر طاقة حرارية تساوي ($79,8 \times 10^9$) كيلوجول. وحيث أنه تتكون نظائر تساوي نسبتها 15 % من الوقود الكلي[36].

وبالتالي فإن كمية الحرارة المنطلقة هي:

$79,8 \times 10^9 \times 0,85 = (67,83 \times 10^9)$ كيلوجول

2 ـ تصنيع الوقود النووي

الوقود النووي: هو عبارة عن مواد يمكن أن تنشطر وتكون كافية للحصول على سلسلة ردود فعل انشطارية تؤدي إلى تحرر أعداد إضافية من النيوترونات تكون قادرة على إحداث تفاعل متسلسل ينتج عنه تولد كمية كبيرة من الطاقة حسب التفاعل النووي الانشطاري الذي سبق ذكره وهو كالآتي:

$$_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{236} \longrightarrow {}_{36}Kr^{89} + {}_{56}Ba^{144} + 3h + 203\ m.e.v.$$

هذا وتقسم عملية تصنيع الوقود النووي إلى مرحلتين:

(36) الطاقة النووية وحادثة تشرنوبل، الدكتور إبراهيم بدران، الدكتور هاني عبيد، الجمعية العلمية الملكية ـ عمان ـ 1988، ص 56.

(أ) مرحلة (عملية) استخلاص الوقود النووي من خاماته، مع تنقيته وتركيزه، واخصابه.

(ب) مرحلة تصنيع الوقود النووي على هيئة قوالب أو أقراص حسب استخداماتها في المفاعلات النووية.

3 ـ خصائص الوقود النووي:

يجب أن يتحلّى الوقود النووي بخصائص رئيسية ترشحه للتعامل معه في المفاعلات النووية بشكل نوعي، وهذه الخصائص هي كالآتي:

1 ـ أن يتمتع الوقود النووي بقدرة عالية على التوصيل الحراري.

2 ـ أن يقاوم الوقود النووي تأثير الإشعاعات العالية التي يمكن أن تؤدي إلى إحداث تغيرات في المواصفات الفنية للوقود النووي مثل التغيرات التي يمكن أن تحدث في أبعاد الوقود، كالتمدد والتشقق. وهذا ما يؤثر على الخواص الميكانيكية والطبيعية للوقود وهذا ما يعرف بـ (Radiation damage).

3 ـ أن يكون للوقود ثباتاً كيميائياً لكي لا تحدث تفاعلات كيميائية بين الوقود ومادة التبريد في حال انهيار أو تحطم مادة التغليف (والتي يشملها الحديث لاحقاً).

4 ـ أن يتمتع الوقود بدرجة انصهار عالية، حتى لا يحدث أي تحولات في الأطوار.

5 ـ أن تكون عملية إنتاج الوقود اقتصادية ومحافظاً على خواص الوقود الطبيعية والميكانيكية والكيميائية.

6 ـ أن يتمتع الوقود بمعامل تمدد صغير جداً.

7 ــ أن لا يحتوي الوقود على المواد الماصة للنيوترونات وأن يكون تركيز المادة المنشطرة فيه عالية جداً.

8 ــ أن تتلاءم مادة الوقود النووي مع مادة التغليف.

9 ــ أن يكون احتجاز المواد المنشطرة داخل الوقود النووي كبيراً، للتقليل من تأثير ضغط الغاز المنشطر على مادة التغليف[37].

4 ــ أنواع الوقود النووي:

يوجد أنواع كثيرة مستخدمة كوقود نووية وهي:

(أ) اليورانيوم (Uranium):

رمزه الكيميائي (U) وهو عنصر كيميائي من مجموعة الأكتينيدات في الجدول الدوري، عدده الذرّي (92)، ووزنه الذرّي (238)، وهو معدن شائع الانتشار في القشرة الأرضية ويُعتبر المادة الوحيدة الطبيعية المحتوية على عناصر قابلة للانشطار وبالأخص (النظير ــ 235) (والنظير ــ 238)[38].

ويوجد اليورانيوم في مجموعتين من الصخور التي تكونت منذ زمن بعيد. وهي الصخور الغرانتية والتي تحتوي على (4) جرام من اليورانيوم في الطن. أما المجموعة الثانية فهي عبارة عن كتل من الرواسب التي تراكمت على الجبال، وتصل نسبة اليورانيوم بها إلى (0,3 %). ويوجد اليورانيوم كناتج ثانوي في بعض الخامات الأخرى، كالخامات الفوسفاتية حيث تحتوي على اليورانيوم بنسبة من (0,05) إلى (0,15 %)، وخامات الذهب كما هو الحال في جنوب أفريقيا. وأحياناً يصاحب اليورانيوم الفحم في مناجمه كما هو الحال في السويد، حيث يحتوي الفحم السويدي على عدة

(37) د. نبيل محمود عبد المنعم، ص 94.

(38) الموسوعة الكيميائية الروسية، ص 344، الجزء الخامس.

مئات من الآلاف من الأطنان من اليورانيوم بكثافة (0,03 %) كما يمكن أن يتواجد اليورانيوم في مياه البحار والمحيطات حيث تحتوي على أربع مليارات من الأطنان بكثافة ثابتة وضعيفة تبلغ من (3) إلى (4) أجزاء بالمليار.

والخامات المعروفة والتي تحتوي على اليورانيوم هي البتشبلند (Pithchblende) وتركيبها الكيميائي هو $\left[(UO_2)_X\,(UO_3)_Y\right]$

وبرانيريت (Brannerit) وهو عبارة عن

$$\left[(U,\ Ca,\ Fe^{2+}\ ,\ Th)_3\ (T_i\ ,\ S_i)_5 O_{16}\right]$$

وكارنوتيت (Carnotite) وتركيبه الكيميائي

$$\left[K_2\,(UO_2)_2\,(VO_4)_2\ .\ nH_2O\right]$$

حيث أن (n=1−3)؛ وتويامونيت (Tyuyamunit) وتركيبها الكيميائي هو

$$\left[Ca\,(UO_2)_2\ .\ (VO_4)_2\ .\ nH_2O\right]$$

حيث أن (n=4−10) [39].

يتكون اليورانيوم الطبيعي من (يورانيوم ــ 238) الذي تبلغ نسبته (99,274 %) و (يورانيوم ــ 235) الذي تبلغ نسبته (0,7205 %).

ولليورانيوم نظائر أخرى هي:

(أ ــ 1) (اليورانيوم ــ 233) وهي مادة قابلة للانشطار، وغير موجودة في الطبيعة، وتتولد في المفاعل النووي من تفاعل النيوترون مع مادة الثوريوم الطبيعي هو (ثوريوم ــ 232) حسب التفاعل الآتي:

(39) الموسوعة الكيميائية الروسية، الجزء الخامس، ص 345.

$$_{90}Th^{232} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{90}Th^{233} \xrightarrow[22.4\ min]{\beta^- decay} {}_{91}Pa^{233} \xrightarrow[27.4\ d]{\beta^- decay} {}_{92}U^{233}$$

(أ ـ 2) (اليورانيوم ـ 232) هي مادة تبلغ فترة نصف العمر 72 سنة، وهي فترة قصيرة بالمقارنة مع اليورانيوم الطبيعي الذي يشع لملايين السنين. ونظراً لوجوده مع (اليورانيوم ـ 233) بنسب ضئيلة، يجعل من استعمال (يورانيوم ـ 233) كوقود نووي صعباً جداً. وذلك لأن (يورانيوم ـ 232) ينتج موجات من أشعة جاما، التي لها قدرة عالية على اختراق الأجسام. الأمر الذي يستلزم اتخاذ تدابير واحتياطات خاصة ومكلفة جداً.

(أ ـ 3) (اليورانيوم ـ 236) ينتج عن تفاعل النيوترون مع الوقود الذي يحتوي على (يورانيوم ـ 235). و (اليورانيوم ـ 236) ماص للنيوترونات مما يقلّل قدرة الوقود على الانشطار وتوليد الطاقة.

(أ ـ 4) (اليورانيوم ـ 237) ينتج عن تفاعل النيوترونات مع الوقود الذي يحتوي على (يورانيوم ـ 235) فترة نصف عمره 6,7 يوم وهذا يتطلب فترة تبريد وتخزين الوقود النووي المستهلك من (100) إلى (150) يوماً، وهذا ما يقلّل من فوائده الاقتصادية.

(أ ـ 5) (يورانيوم ـ 239) هو ناتج عن تفاعل النيوترون مع (اليورانيوم ـ 238) والذي يتحول إلى مادة هي (البلوتونيوم ـ 239) بالتفاعل التالي:

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} \xrightarrow[\beta^-]{\text{٢٣,٥ دقيقة}} {}_{93}Np^{239} \xrightarrow[\beta^-]{\text{٢,٣٥ يوم}} {}_{94}Pu^{239}$$

(ب) مركبات اليورانيوم:

فهي:

(ب ـ 1) ثنائي أكسيد اليورانيوم (UO_2) وهو المستخدم كوقود

نووي في مفاعلات الماء الخفيف والثقيل، ومفاعلات التوليد السريع، وهو عبارة عن مادة سيراميكية، ثابتة لا تتعرض لأي تلف ميكانيكي درجة انصهارها 2865 درجة مئوية، ولا تتفاعل هذه المادة مع الماء، أي إن لديها مناعة ضد الرطوبة. غير أن هذه المادة غير جيدة التوصيل الحراري.

(ب ـ 2) ثالث أكسيد اليورانيوم (UO_3) تبلغ كثافة هذه المادة (8,02) وعند درجة حرارة (650) درجة مئوية، تتخلل هذه المادة في الهواء إلى (U_3O_8) ويمكن الحصول على هذه المادة من تفكك مادة [$(NH_4)_2U_2O_7$] عند درجة حرارة تبلغ (500) درجة مئوية وتسمى هذه المادة أمونيوم ديورانيت (Ammonium Diuranat) وتسمى أيضاً الكعك الأصفر (Yelow Cake)[40]، تذوّب هذه المادة بالأحماض فتعطي أملاح اليورانيك ومع القلويات تعطي أورانات.

(ب ـ 3) (U_3O_8) يمكن إنتاج هذا الأكسيد عن طريق أكسدة ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) أو عن طريق تسخين ثالث أكسيد اليورانيوم (UO_3)، يذوب هذا الأكسيد عند تسخينه في حامض الكبريتيك المركز وحامض الفوسفوريك المركز (H_3PO_4) وحامض النتريك المركز (HNO_3).

(ب ـ 4) كربيد اليورانيوم (UC) هي مادة سيراميكية تستخدم للمفاعلات النووية ذات درجة الحرارة العالية (HTGR) أثبتت التجارب أن التوصيل الحراري لكربيد اليورانيوم أفضل من التوصيل الحراري لثاني أكسيد اليورانيوم، وكثافته (13,63) جرام/سم^3. أما من عيوبه أنه أقل احتفاظاً بالمواد المنشطرة من أكسيد اليورانيوم. أسهل طريقة للحصول على كربيد

---

(40) ترسانة إسرائيل النووية ـ بيتر براي (Peter, Pry) / مترجم / مؤسسة الأبحاث العربية ـ بيروت ـ 1989 ـ ص 58.

اليورانيوم هي تسخين مخلوط (UO_2) مع مسحوق الجرافيت إلى درجة حرارة (1800) درجة مئوية وممكن الوصول بدرجة الحرارة إلى (1900) درجة مئوية، تجري العملية في جو فراغ كالآتي:

$$UO_2 + 3C \xrightarrow[\text{Vacuum}]{1800\text{-}1900^\circ C} UC + 2CO$$

درجة انصهار كربيد اليورانيوم الناتج هي (2350) درجة مئوية

(ب ـ 5) ثنائي كربيد اليورانيوم (UC_2) هو وقود مخصص كذلك لمفاعلات الاحرار العالي (High temperature gas cooled (HTGR) reactor) كثافة هذه المادة هي (11,68)، درجة انصهارها (2475) درجة مئوية، يمكن الحصول على هذه المادة من تفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الكربون عند درجة حرارة (1700) درجة مئوية

$$UO_2 + 4C \longrightarrow UC_2 + 2CO$$

1700 درجة مئوية

(ج) الثوريوم ـ 232:

إن هذا العنصر أكثر انتشاراً من عنصر اليورانيوم ويمكنه بنجاح باهر، أن يصبح خاماً لإنتاج الوقود النووي الصناعي، وهو (الثوريوم ـ 232) ($_{90}Th^{232}$) من أهم خامات الثوريوم هي المونازيت (Monazit) المستخرج بمعدل (10000) طن إلى (12000) طن في السنة من رمل الشواطىء. والمونازيت هي خامات فوسفاتية للمعادن النادرة تحتوي من (1 %) إلى (18 %) من أكسيد الثوريوم وهي موجودة في الهند والبرازيل وسيلان وأندونيسيا وكندا ومصر. ولا يمكن لهذا المعدن وهو على صورته النقية، أن يدخل في تفاعل متسلسل، لأنه ينشطر بتأثير النيوترونات السريعة جداً فقط، ولكنه إذا تعرض للقذف بتيار قوي من النيوترونات داخل المفاعل

النووي، فإنه يتحول إلى نظير صناعي جديد لليورانيوم هو (اليورانيوم ـ 232) والذي يعتبر مثل (اليورانيوم ـ 235) والبلوتونيوم[41].

ولكن عملية إنتاج (اليورانيوم ـ 233) صعبة، ويمكن إنتاجه عن طريق وضع (الثوريوم ـ 232) في مفاعل وقذفه بالنيوترونات حتى يتحول إلى (يورانيوم ـ 233)، إن عملية الحصول على (اليورانيوم ـ 233) بهذه الطريقة أصعب من الحصول على (اليورانيوم ـ 235)، لأن النظير الأول يحتاج في البدء إلى إنتاجه من (الثوريوم ـ 232) ومن ثم القيام بعملية فصله واستخلاصه من المواد المتخلفة من التفاعل. في حين كما سبق وتحدثنا أن (اليورانيوم ـ 235) يوجد في اليورانيوم الطبيعي.

(د) مركبات الثوريوم:

يوجد مركب مهم هو ثاني أكسيد الثوريوم (ThO_2) وهي مادة سيراميكية، يمكن الحصول عليها عند حرق معدن الثوريوم في الهواء، كثافة ثاني أكسيد الثوريوم هي (9,7)، درجة انصهار هذه المادة (3200) درجة مئوية ($16 \pm$) درجة غليانها (4400) درجة مئوية، تذوب هذه المادة في حامض النتريك بسرعة إذا وجدت أيونات الفلور[42]. يمكن استخدام هذا المركب كوقود نووي في مفاعلات الماء الخفيف والثقيل ومفاعلات التوليد السريع ومفاعلات الاحرار العالي التي تبرد بالغازات كوقود نووي.

(هـ) البلوتونيوم (Pu):

تعتبر المفاعلات النووية والأجهزة الخاصة بتنقية قضبان اليورانيوم كيميائياً بعد خروجها من المفاعلات، من أهم معدات المؤسسات

---

(41) طاقة الذرّة ـ دار مير للطباعة والنشر، موسكو، 1969، ك. جلادكوف، ص 256.
(42) الموسوعة الكيميائية الروسية، الجزء الخامس، ص 222.

الصناعية لإنتاج البلوتونيوم. وأثبت العالمان سيبورك (Seaborg) وبرلمان (Perlman) عن وجود كميات قليلة من البلوتونيوم في خام البتشبلند، حيث برهنا أن مقدار البلوتونيوم في البتشبلند يعادل جزء من 10^{14}.

نظائر البلوتونيوم:

(هـ ـ 1) (البلوتونيوم ـ 236) (Pu^{236}) ينتج عن تفاعل نيوترون أو نيوترونين مع (النبتونيوم ـ 232)، لكنه يعطي بعد ذلك (يورانيوم ـ 232) ثم (ثوديوم ـ 228).

(هـ ـ 2) (البلوتونيوم ـ 238) ينتج عن تفاعل نيوترون مع نواة (النبتونيوم ـ 239).

(هـ ـ 3) (البلوتونيوم ـ 239) هذا النظير من البلوتونيوم نشط إشعاعياً بمدة نصف عمر طويلة تبلغ 24 ألف سنة يبعث بدقائق ألفا حسب التفاعل التالي:

$$_{91}Pu^{239} \longrightarrow {}_{92}U^{235} + {}_{2}He^{4}$$

وهذا النظير من البلوتونيوم يلعب دوراً هاماً في مشروع القنبلة النووية وذلك لأنه قابل للانشطار بكل من النيوترونات السريعة والنيوترونات البطيئة. إذ تكفي 5 ـ 8 كيلوغرامات من البلوتونيوم (Pu-239) لتحقيق الكتلة الحرجة[43].

ينتج (البلوتونيوم ـ 239) عن تفاعل نيوترون مع نواة (اليورانيوم ـ 238) وهذا النوع ممكن استخدامه كوقود نووي. والذي لم يكن له وجود قبل أربعين سنة، ومن الممكن أن الإنسان سيتمكن من معالجة كل (اليورانيوم ـ 238) غير القابل للانشطار وتحويله إلى بلوتونيوم والذي يعتقد

(43) بيتر براي، ص 64.

أنه موجود بكمية تفوق (اليورانيوم ـ 235) بمئة وخمسون ضعف وتحويله إلى بلوتونيوم[44].

(هـ ـ 4) (بلوتونيوم ـ 240) ينتج عن تفاعل نيوترون مع نواة (بلوتونيوم ـ 239).

(هـ ـ 5) (بلوتونيوم ـ 241) ينتج عن تفاعل نيوترون مع نواة (بلوتونيوم ـ 240).

(هـ ـ 6) (بلوتونيوم ـ 242) ينتج عن تفاعل نيوترون مع نواة (بلوتونيوم ـ 241).

(هـ ـ 7) (البلوتونيوم ـ 243) ينتج عن تفاعل النيوترون مع نواة (البلوتونيوم ـ 242).

(هـ ـ 8) (البلوتونيوم ـ 244) ينتج عن تفاعل النيوترون مع نواة (البلوتونيوم ـ 243).

أكاسيد البلوتونيوم وهي (PuO_2) و (PuO_3).

إن (PuO_2) وهو النوع المستخدم بكثرة كوقود نووي لأن خواصه شبيهة بخواص (UO_2) الذي سبق الحديث عنه.

(44) جلادكوف، ص 258.