

محطات تخصيب اليورانيوم وتصنيع الوقود النووي

- مقدمة • خامات اليورانيوم وتعيينها • عمليات التخصيب (الإثراء) • طرائق تخصيب اليورانيوم • محطات تصنيع الوقود النووي • تمارين

(١,١) مقدمة

تُعدُّ مرحلة تخصيب اليورانيوم من أهم وأصعب حلقات دورة الوقود ؛ لأنها تحتاج إلى تقنيات عالية وتكاليف باهظة. ولقد ارتبط تخصيب اليورانيوم في القرن الماضي بالأسلحة النووية، وتدميرها الفتاك للحياة والممتلكات والبيئة مما زاد من مخاوف انتشارها فجعلت قوانين واتفاقيات دولية تحد من هذا النشاط. وهكذا أصبح نشاط تخصيب اليورانيوم حكراً فقط على بعض الدول الكبرى والمتقدمة تقنياً في العالم. وكذلك الحال بالنسبة إلى نشاط معالجة الوقود النووي المستهلك ؛ لأنه يحتوي على مادة البلوتونيوم التي أصبحت حالياً الأكثر استعمالاً لإنتاج الأسلحة النووية، وسنخصص فصلاً كاملاً في هذا الكتاب لدراسة هذا الموضوع إن شاء الله.

سنتناول في هذا الفصل عمليات استخراج معدن اليورانيوم من باطن الأرض وتكريره، ثم معالجته كيميائياً ؛ ليصبح جاهزاً للتخصيب. بعد ذلك سنتطرق إلى شرح أكثر التقنيات استعمالاً وكفاءةً لتخصيب اليورانيوم.

ونختتم هذا الفصل بتناول الطرائق المختلفة لتصنيع الوقود النووي سواء كان من خامات اليورانيوم الطبيعي، أو المخصب، أو خليط أكسيد اليورانيوم، والبلوتونيوم الناتج عن عمليات تكرير الوقود المستهلك.

(١,٢) خامات اليورانيوم وتعيديها

اُكتشفت خامات اليورانيوم في أواخر القرن الثامن عشر (١٧٨٩م)، وانحسرت استعمالاته قبل العصر النووي في تلوين الزجاج، وصناعة الدهانات المضئية للساعات، وبعض الأجهزة الأخرى. كذلك استعملت خامات اليورانيوم التي تحتوي على عنصر الراديوم المشع في الينابيع الحارة للأغراض الطبية في معالجة بعض الأمراض. لكن منذ بداية العصر النووي (١٩٤٠م) استعمل جل اليورانيوم المنتج في صناعة الأسلحة النووية، ثم بعد ذلك لإنتاج الوقود النووي للمفاعلات.

توجد خامات اليورانيوم في باطن الأرض مثل العديد من المعادن الأخرى ونسب وفرته تفوق بكثير نسبة المعادن الثمينة، مثل الذهب والفضة. وتتراوح نسبة تركيز اليورانيوم بين ٢ و ٤ جزء في المليون (ppm) في حجر القرانان و ١٣ ppm في ماء البحر، وتصل إلى ٤٠٠ ppm في بعض المناطق.

توزع خامات اليورانيوم في العديد من مناطق العالم، إلا أنها توجد بتركيز عالٍ يسمح اقتصادياً باستخراجه في أستراليا، وكندا، وأمريكا، وجنوب إفريقيا، ونسبياً في البرازيل، وكازاخستان، والصين، وكذلك في بعض الدول الأخرى، لكن بكميات قليلة.

(١,٢,١) مناجم اليورانيوم

ساعدت الإشعاعات الصادرة عن خامات اليورانيوم في الكشف عنها على الرغم من نشاطها الإشعاعي الضعيف؛ ولهذا تستخدم أجهزة الكشف عن الإشعاعات بكثرة أثناء مرحلة المسح والتنقيب؛ لمعرفة تركيز المعدن، وتحديد منطقة

المنجم. بعد تحديد المنطقة والطبقة الجيولوجية للمعدن يتم تحديد النوع المناسب للمنجم، وطريقة استغلاله.

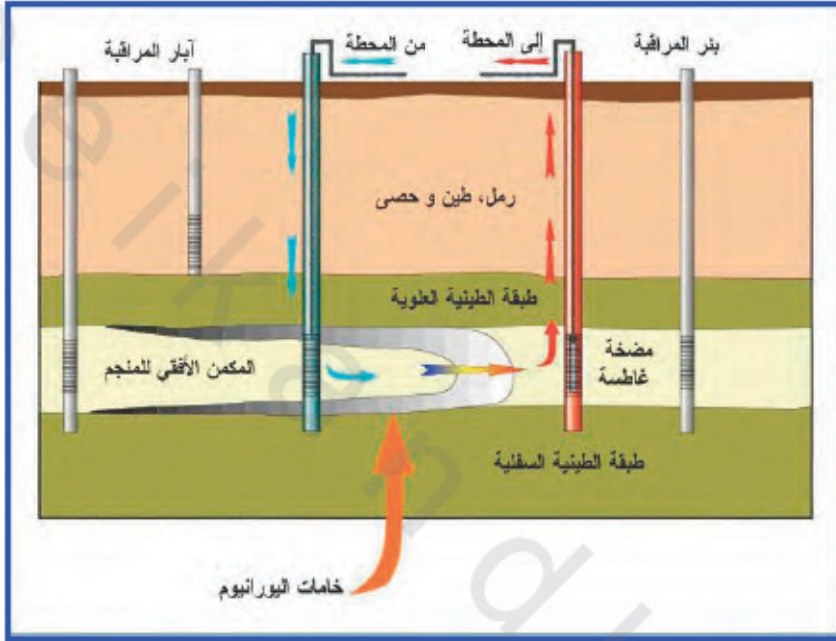
وتنقسم مناجم اليورانيوم إلى ثلاثة أنواع: منجم مفتوح على السطح، ومنجم تحت سطح الأرض من خلال أنفاق، ومنجم آبار الترشيح. ويُفضل اختيار منجم الأنفاق لتفادي نقل الكميات الكبيرة من التربة والصخور للوصول إلى طبقة المعدن إذا كانت عميقة. ويُفضل المنجم المفتوح على السطح عندما لا يفوق عمق طبقة المعدن أكثر من ١٢٠ متراً. وفي هذه الحالة تجمع بعد الحفر التربة وصخور الطبقة المعدنية في كلتا الحالتين السابقتين، وتُرسل عن طريق الشاحنات، أو السكك الحديدية إلى محطة الطحن والتكرير.

تزايد منذ السبعينات من القرن الماضي عدد مناجم اليورانيوم بآبار الترشيح، مما يقلل من تكلفة الإنتاج وتفادي تحويل التربة والصخور من مكانها، وتتميز هذه المناجم بحفر آبار متقاربة حتى طبقة المعدن، ويُوضع في بعضها خليط من المواد السائلة المذيبة لخامات اليورانيوم، ثم تُسحب من الآبار الأخرى بعد ترشيحها داخل طبقة مهد المعدن. بعد ذلك يُنقل السائل المستخرج إلى محطة المعالجة والتصفية للحصول على اليورانيوم. ويصل إنتاج هذا النوع من المناجم إلى حوالي ١٦٪ حالياً من الإنتاج الإجمالي لليورانيوم في العالم. يوضح الشكل رقم (١، ١) منجم آبار ترشيح اليورانيوم.

(١، ٢، ٢) عمليات تعدين اليورانيوم

عندما يصل المعدن الخام من المنجم إلى محطة التكرير التي تكون قرية عادة، تُطحن الصخور وتُغريل، ثم يخلط المسحوق الناتج بكميات كبيرة من الماء. تضاف إلى هذا المحلول كميات كبيرة من الكبريت أو محلول قلوي؛ لإذابة خامات اليورانيوم. بعد ذلك يرسب اليورانيوم ويصل تركيزه إلى ٨٥-٩٥٪ ثم تجفيفه للحصول على مادة أكسيد اليورانيوم (U_3O_8) ذات اللون الأصفر، أو ما يسمى بالكعك الأصفر. بعد ذلك

توضع مادة أكسيد اليورانيوم الطبيعي هذه في براميل ، ثم تباع على هذا الشكل ، ثم يتجه إلى محطات التحويل والتخصيب.



الشكل رقم (١،١). منجم آبار ترشيح اليورانيوم [٢٥].

تختلف محطة تكرير وتركيز اليورانيوم الناتج من منجم آبار الترشيح عن المحطات الأخرى ؛ لأن ناتج تلك الآبار هو على شكل محلول حامض قلوي يتم نقله مباشرة من الآبار إلى المحطة. يحتوي هذا المحلول على اليورانيوم المؤكسد الذائب ، ويستخلص عن طريق تبادل الأيونات بالراتينج (IX) ، أو تبادل الأيونات الذائبة (SX) حسب ملوحة المحلول المستخدم. بعد ذلك يُزال اليورانيوم من الراتينج ويُرسب ، ثم يُنقى ويجفف للحصول على الكعك الأصفر (U_3O_8).

(١,٢,٣) نفايات التكرير

بعد عملية التكرير تجمع بقايا التربة والصخور حول المحطة بكميات كبيرة خاصة عندما يكون المنجم مفتوحاً أو تحت الأرض. وتُكس هذه الكميات على شكل أكوام مكونة هضبة صغيرة يجب عزلها عن البيئة ؛ لأنها تعدُّ من النفايات ولا تمثل هذه النفايات خطراً على البيئة بشكل عام على الرغم من أنها تحتوي على مواد مشعة ، مثل الراديوم ، ومواد ثقيلة أخرى ؛ وذلك لأن نشاطها الإشعاعي عادة ما يكون قليلاً جداً.

أما نفايات محطة تكرير اليورانيوم المستخرج من مناجم آبار الترشيح فهي قليلة جداً مقارنةً بنفايات المناجم التقليدية ، ويعدُّ ذلك من أهم ميزات هذا النوع من المناجم ؛ ذلك لأن المحلول المتبقي بعد عمليات التركيز يُعالج قبل ضخه من جديد في آبار الترشيح. وتتمثل عملية المعالجة هذه في إضافة الأكسجين ، وتعديل الحموضة ، وتنقية المحلول من المعادن والشوائب ؛ ولهذا عادةً ما تكون كميات النفايات قليلة مما يسمح بدفنها قرب المحطة مع التأكيد من عدم تسربها إلى منطقة المنجم أو المياه الجوفية.

(١,٣) عملية التخصيب (أو الإثراء)

يتكون اليورانيوم الطبيعي من خليط نظائر اليورانيوم بالنسب متفاوتة الآتية : (U^{238} - 99.3%) و(U^{235} - 0.72 %) و(U^{234} - 0.01 %). تُعرف عملية التخصيب بزيادة نسبة النظير U^{235} الذي يمثل المادة الانشطارية في اليورانيوم. أما النظير U^{238} الذي يمثل النسبة الكبيرة في اليورانيوم الطبيعي فهو مادة قابلة للانشطار ، ولا تساهم في الانشطارات مباشرة ؛ ولهذا فإن جل الوقود المستعمل في المفاعلات النووية مخصب بنسبة ٣-٥% ، ولا يمكن تخصيب اليورانيوم كيميائياً ؛ لأن هذه التفاعلات يحكمها عدد إلكترونات الذرات المتفاعلة. وبما أن النظائر لها عدد الإلكترونات نفسها ، فكلها تتفاعل كيميائياً معاً وبالطريقة نفسها ؛ مما يجعل من الصعب فصلها عن بعضها. ولهذا

فإن تخصيب اليورانيوم يحتم استخدام الطرائق الفيزيائية ، وذلك بالاستفادة من فرق الكتلة البسيط الذي لا يتجاوز ثلاث وحدات وزنية ذرية بين نظيري اليورانيوم U^{235} و U^{238} الذي يساوي $(\Delta A = 238-235 = 3 \text{ amu})$.

(١,٣,١) العوامل الأساسية لعملية التخصيب

قبل شرح الطرائق الفيزيائية لتخصيب اليورانيوم يفضل تعريف العوامل الأساسية التي تحكم عملية التخصيب وفصل النظائر عن بعضها. لنفرض أن لدينا وحدة تخصيب فيزيائية ، فمن غير شك أن يكون لها مدخل لليورانيوم الطبيعي (U^{235} - 0.72 % و U^{238} - 99.3 %) ، الذي يمثل المادة الأولية ومخرجين. ويصدر من المخرج الأول اليورانيوم بنسبة تفوق النسبة الأصلية ٠,٧٢ % ويصدر من المخرج الثاني اليورانيوم المنضب بنسبة أقل من النسبة الأصلية. يوضح الشكل رقم (١,٢) وحدة مبسطة لتخصيب اليورانيوم.



الشكل رقم (١,٢). وحدة تخصيب اليورانيوم.

نستعمل نسب تخصيب الذرات الداخلة N_f ونسب تخصيب الذرات الخارجة N_p و N_r لتعريف العوامل الأساسية لوحدة التخصيب ، وعملية الفصل بين النظائر على النحو الآتي :

أولاً: عامل التخصيب

$$(١,١) \quad \alpha = \frac{N_P(1 - N_F)}{N_F(1 - N_P)}$$

ثانياً: عامل التنضيب

$$(١,٢) \quad \beta = \frac{N_F(1 - N_T)}{N_T(1 - N_F)}$$

ثالثاً: عامل الفصل

$$(١,٣) \quad \alpha \cdot \beta = \frac{N_P(1 - N_T)}{N_T(1 - N_P)}$$

(١,٣,٢) مقياس شغل الفصل

نلاحظ أن عامل الفصل هذا لا يكفي لمعرفة كفاءة وحدة التخصيب والشغل اللازم لفصل النظائر؛ ولهذا اتفق على تعريف مقياس يأخذ بعين الاعتبار جهد الشغل اللازم لقياس عملية التخصيب المطلوب. يُسمى هذا المقياس بشغل الفصل الذي يمكن استنتاجه من المعادلات الرياضية لوحدة التخصيب، وذلك على النحو الآتي:

أولاً: نسبة كمية المادة الخام الداخلة إلى كمية المادة المخصبة المنتجة

$$(١,٤) \quad \frac{F}{P} = \frac{(N_P - N_T)}{(N_F - N_T)}$$

ثانياً: نسبة كمية المادة المنضبة الخارجة إلى كمية المادة المخصبة المنتجة

$$(١,٥) \quad \frac{T}{P} = \frac{N_P - N_F}{N_F - N_T}$$

ترمز الحروف F، P، T إلى كمية المادة الداخلة والخارجة من وحدة التخصيب تتالياً.

ثالثاً: مقياس شغل الفصل

$$(١,٦) \quad SW = PV(N_P) + TV(N_T) - FV(N_F)$$

حيث الدالة $V(N)$ حل لمعادلة تفاضلية من الدرجة الثانية لا تعتمد إلا على تغيير تركيز اليورانيوم الداخل والخارج من وحدة التخصيب.

$$(١,٧) \quad V(N) = (2N - 1) \ln\left(\frac{N}{1 - N}\right)$$

وحدة مقياس شغل الفصل (separation work unit: SWU) وهي الكيلوجرام أو الطن حيث إن:

$$(١,٨) \quad \begin{aligned} 1 \text{ SWU} &= 1 \text{ Kg SW} \\ 1 \text{ KSWU} &= T \text{ SW} \end{aligned}$$

تستعمل هذه الوحدة أيضاً لقياس الكميات المنتجة لمحطات التخصيب، مثل خمسين طن وحدة شغل في السنة (50 TWS/year)، أو لقياس الطاقة اللازمة لإنتاج وحدة شغل الفصل بالكيلوواط ساعة (Kwhr/SWU).
مثال:

لنفرض أننا نرغب في إنتاج كيلوجرام واحد من اليورانيوم المخصب بنسبة 3.5% من (^{235}U) ، ونسمح بأن تكون نسبة اليورانيوم المنضب 0.3% من (^{235}U) فقط. أوجد كمية اليورانيوم اللازمة لذلك وكمية اليورانيوم المنضب الناتجة، ثم احسب عدد وحدات شغل الفصل لوحدة التخصيب هذه.
الحل:

١- بتطبيق المعادلتين (١,٤) و (١,٥) نحصل على ما يلي:

كمية اليورانيوم الطبيعي (F) والمنضب (T)

$$F = P \cdot \frac{(N_P - N_T)}{(N_F - N_T)} = 1 \cdot \frac{(3.5 - 0.3)}{(0.71 - 0.3)} = 7.8 \text{ Kg}$$

$$T = P \cdot \frac{(N_P - N_F)}{(N_F - N_T)} = 1 \cdot \frac{(3.5 - 0.71)}{(0.71 - 0.3)} = 6.8 \text{ Kg}$$

٢- بتطبيق المعادلتين (١,٦) و (١,٧) نحصل على ما يلي :

$$V(N_P) = (2 \times 3.5 \times 10^{-2} - 1) \ln \left(\frac{3.5 \times 10^{-2}}{1 - 3.5 \times 10^{-2}} \right) = 3.085$$

$$V(N_T) = (2 \times 0.3 \times 10^{-2} - 1) \ln \left(\frac{0.3 \times 10^{-2}}{1 - 0.3 \times 10^{-2}} \right) = 5.771$$

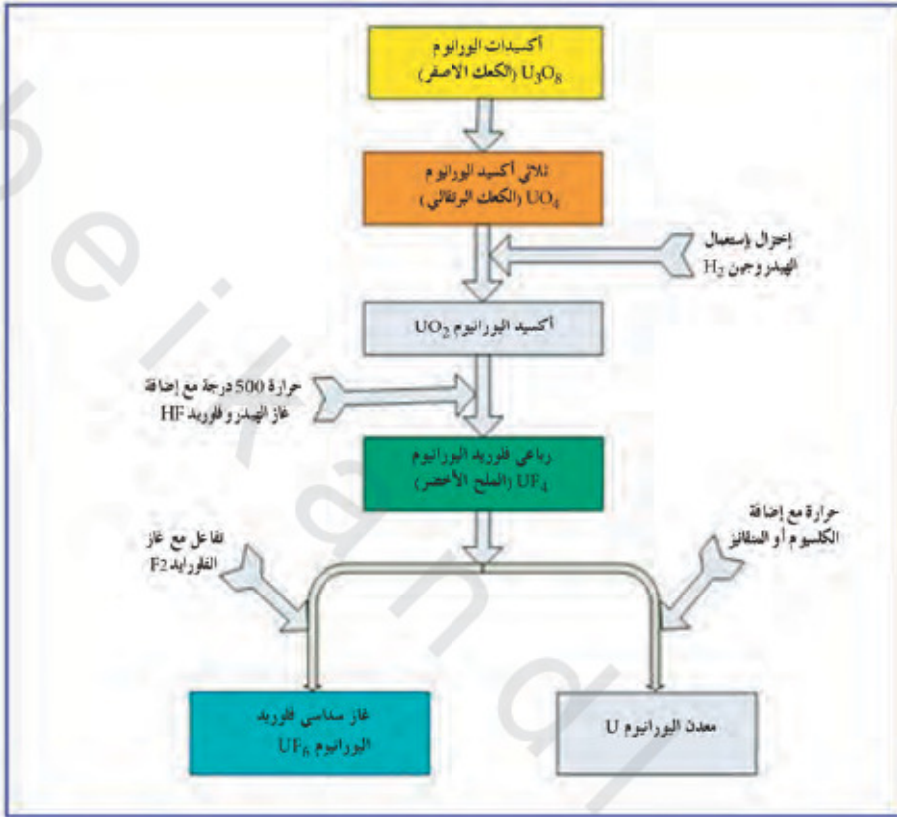
$$V(N_F) = (2 \times 0.71 \times 10^{-2} - 1) \ln \left(\frac{0.71 \times 10^{-2}}{1 - 0.71 \times 10^{-2}} \right) = 4.871$$

$$SWU = 1 \times 3.085 + 6.8 \times 5.771 - 7.8 \times 4.871 = 4.334$$

تجدر الإشارة إلى أن تكلفة اليورانيوم المخصب تركز على تكلفة اليورانيوم الطبيعي ، وتكلفة وحدات شغل الفصل (SWU) اللازمة لذلك. ولهذا يجب التوفيق بين التكلفة، علماً أن عدد وحدات شغل الفصل تتزايد كلما انخفضت نسبة خصوبة اليورانيوم المنضب الناتج. فمثلاً إذا أردنا استعمال كمية أقل من (6.5 Kg) من اليورانيوم الطبيعي يجب توفير شغل أكبر (SWU=5.424) ، وذلك عند إنتاج يورانيوم منضب بنسبة 0.2 % عوضاً عن اليورانيوم المنضب السابق بنسبة 0.3 %.

(١,٤) طرائق تخصيب اليورانيوم

قبل عمليات التخصيب يجب تحويل اليورانيوم إلى غاز لتسهيل هذه العملية المعقدة ؛ ولهذا يُنقل أكسيد اليورانيوم (U_3O_8 - الكعك الأصفر) من المنجم إلى محطة التحويل. يُنقى في هذه المحطة ويحوّل إلى غاز سداسي فلوريد اليورانيوم UF_6 وفق تفاعلات متتالية ، كما هو موضح في الشكل رقم (١,٣) الآتي :



الشكل رقم (١,٣). عمليات تصنيع غاز سداسي فلوريد اليورانيوم UF_6 .

يُحفظ غاز إقزافلوراد اليورانيوم UF_6 في نهاية العمليات السابقة ليصبح سائلاً، ثم يوضع في خزانات خاصة تصل حمولتها إلى ١٥ طناً، ثم يُبرد من جديد فيتحول إلى الحالة الصلبة على شكل بلورات بيضاء اللون لينقل بعد ذلك إلى محطات التخصيب. ويوضح الجدول رقم (١,١) الآتي بعض خصائص غاز سداسي فلوريد اليورانيوم.

الجدول رقم (١, ١). بعض خصائص غاز سداسي فلوريد اليورانيوم UF_6 .

الحالة	درجة الحرارة ($^{\circ}C$)	الكثافة (g/cm^3)
صلبة	20.7	5.09
الانصهار	64.02	3.67
سائل	148.90	3.043
غاز	230.20	-
النقاط المهمة	درجة الحرارة ($^{\circ}C$)	الضغط (bar)
نقطة التبخر	56.40	1.01
النقطة الثلاثية	64.02	1.52
النقطة الحرجة	230.20	45.60

منذ أربعينيات القرن الماضي أُجري كثير من الأبحاث لتخصيب اليورانيوم ابتداءً من محطات الكتلة لفصل أيونات نظائر اليورانيوم مروراً بالطرد المركزي والانتشار الغازي، وانتهاءً باستخدام الليزر. لم تصل إلى مرحلة التصنيع التجاري إلا طريقتا الطرد المركزي والانتشار الغازي، ولا تزال بعض المحاولات جارية باستخدام الليزر؛ ولهذا سنتطرق إلى شرح أهم طرائق تخصيب اليورانيوم.

(١, ٤, ١) التخصيب بالطرد المركزي

يعتمد تخصيب اليورانيوم بطريقة الطرد المركزي على دوران العديد من الوحدات المتتالية بسرعة كبيرة جداً. وتتكون كل وحدة من أسطوانة ذات محور عمودي دوّار مملوء بغاز سداسي فلوريد اليورانيوم UF_6 ، وتدور كل أسطوانة بسرعة فائقة تقارب سرعة الصوت مما ينتج داخلها قوة طاردة تجعل الجزيئات الثقيلة $^{238}UF_6$ تتحرك نحو الجدار الداخلي والجزيئات الخفيفة $^{235}UF_6$ تتحرك نحو محور الأسطوانة. وهكذا تستغل طريقة الطرد المركزي لتخصيب اليورانيوم فرق الكتلة بين جزيئات غاز سداسي فلوريد اليورانيوم UF_6 ، ويمكن حساب هذا الفرق وفق الكتل الجزيئية لنظائر اليورانيوم والفلوريد M_1 و M_2 كما يلي:

$$\begin{aligned}
 & \frac{M_2 - M_1}{M_2} \times 100 \\
 (١,٩) \quad & = \frac{(238 + 6 \times 19) - (235 + 6 \times 19)}{(238 + 6 \times 19)} \times 100 \\
 & = 0.85 \%
 \end{aligned}$$

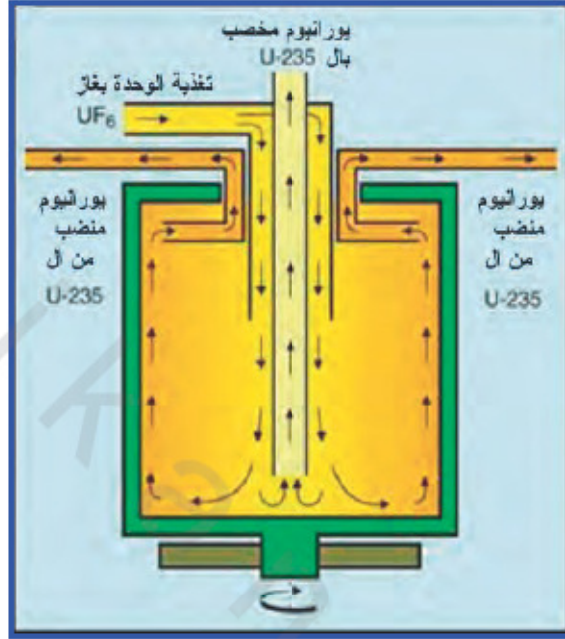
لتحسين هذا النظام يُولد تيار معاكس داخل الأسطوانة عن طريق الحمل الحراري طول المحور بالتسخين، وهكذا يرتفع الغاز عند الجدار وينزل عند محور الأسطوانة. وبهذه الطريقة يصبح الغاز الأكثر ثراءً أو خصوبةً في الأسفل والغاز المنضب في أعلى الأسطوانة، وليس على أطراف قطرها. ولا يحتاج سريان الغاز في هذه الوحدة إلى مكبس أو ضغط خارجي بسبب فرق الضغط الناتج عن حقل قوى الطرد المركزي، الذي يجعل ضغط الغاز عالياً قرب الجدار وضعيفاً قرب محور الأسطوانة؛ ولهذا تُوضع فتحة أنبوب خروج الغاز المنضب قرب الجدار الداخلي في أعلى الأسطوانة وفتحة أنبوب خروج الغاز المخصب قرب الجدار الداخلي أيضاً لكن في أسفل الأسطوانة. أما غاز التغذية فيدخل عند محور المنطقة الأقل ضغطاً ومن أعلى الأسطوانة. ويوضح الشكل رقم (١,٤) مدخل الغاز المغذي UF_6 ومخرجي اليورانيوم المنضب والمخصب لوحدة الطرد المركزي.

(١,٤,١,١) خصائص وحدة تخصيب الطرد المركزي

يعتمد عامل الفصل وقدرته على خصائص الغاز وأبعاد وحدة التخصيب وسرعة الدوران، ومن المهم دراسة المؤثرات الأساسية على هذه العوامل لتحسين أداء وحدات تخصيب الطرد المركزي في المستقبل. تُكتب نظرياً معادلتا عامل وقدرة الفصل على النحو الآتي:

أولاً: عامل الفصل

$$(١,١٠) \quad \alpha.\beta = \exp \left[\frac{(M_2 - M_1)V^2}{2RT} \cdot \frac{L}{d} \cdot \sqrt{2} \right]$$



الشكل رقم (١,٤). تخصيب اليورانيوم بالطرد المركزي [٣٢].

ثانياً: قدرة الفصل

$$(١,١١) \quad \delta_U = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot D \cdot L \left[\frac{(M_2 - M_1) \cdot V^2}{2RT} \right]^2$$

حيث إن:

M_1 و M_2 : الكتل الجزيئية التي يجب فصلها.

R و D : ثابت الغاز وثابت الانتشار تتالياً.

ρ : كثافة الغاز و T : درجة الحرارة ($^{\circ}K$)

d و L : قطر الأسطوانة وارتفاعها.

v : سرعة الدوران.

نلاحظ من خلال المعادلة (١,١١) أن قدرة الفصل تتناسب طردياً مع زيادة ارتفاع الأسطوانة (L) وسرعة دورانها القطري (v) ؛ ولهذا فإن الكثير من الجهود تبذل حالياً للحصول على أفضلهما لتحسين أداء وحدة التخصيب.

(١,٤,١,٢) ديناميكية وحدة التخصيب

يكن سر نجاح تصميم وحدة تخصيب الطرد المركزي في اختيار متانة المواد المستعملة، وأبعاد أسطوانة الوحدة، وسرعتها، ومن المعلوم أن دوران الأسطوانة بسرعة يسبب اهتزازات عندما يُسمى بالتردد الحرج الذي يجب تفاديه، وبما أن لأبعاد الأسطوانة وسرعتها ارتباطاً وثيقاً بالتردد الحرج، فقد جرت العادة بتشغيل وحدة التخصيب تحت هذا التردد، لكن تشير أحدث الدراسات أنه من الممكن تشغيل الوحدة فوق هذا التردد؛ لتحسين قدرة الفصل. ولا تتوافر معلومات كثيرة عن تفاصيل تقنية وحدات التخصيب؛ لأن أكثرها لا يزال سرياً. لكن من المعلوم أن قطر الأسطوانة يتراوح بين ١٥ و ٢٠ سم، وطولها حوالي ٢,١ متراً، وسرعة الدوران بين ٥٠٠٠٠ و ٧٠٠٠٠ دورة في الدقيقة.

(١,٤,٢) التخصيب بالفوهات المنحنية

طريقة تخصيب اليورانيوم بالفوهات المنحنية شبيهة بطريقة تخصيب اليورانيوم بالطرد المركزي، حيث إنها تستغل أيضاً فرق الكتلة لجزيئات غاز سداسي فلوريد اليورانيوم. تستخدم هذه الطريقة غاز UF_6 المضغوط مع الهيدروجين أو الهليوم وفوهات منحنية تتخللها حواجز ذات مدارات محددة. عندما يسمح للغاز المضغوط بالخروج من ثقب صغيرة يتمدد ويكتسب سرعة كبيرة قبل دخوله الفوهات المنضبة. وتحت تأثير القوة الطاردة داخل الفوهة تتجه الجزيئات الخفيفة $^{235}UF_6$ نحو المدارات الصغيرة والجزيئات الثقيلة $^{238}UF_6$ نحو المدارات الكبيرة مما يسمح بفصلهما عن بعضهما.

يوضح الشكل رقم (١,٥) مبدأ طريقة تخصيب اليورانيوم بالفوهات المنحنية. أكبر عيب هذه الطريقة هو استهلاكها الكبير للطاقة لكبس الغاز وتبريده، أما أكثر

الدول اهتماماً بطريقة التخصيب هذه فهي جنوب أفريقيا والبرازيل، حيث لا تزال لهما أبحاث في هذا المجال.



الشكل رقم (١,٥). تخصيب اليورانيوم بالفوهات المنحنية [٣٢].

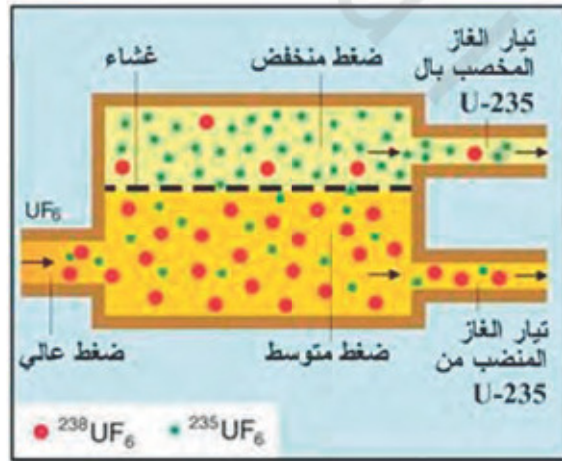
(١,٤,٣) التخصيب بالانتشار الغازي

يعتمد مبدأ تخصيب اليورانيوم بطريقة الانتشار الغازي على اختلاف سرعة اختراق جزيئات غاز سداسي فلوريد اليورانيوم $^{238}\text{UF}_6$ و $^{235}\text{UF}_6$ لغشاء له ثقوب صغيرة جداً (قطر: $400-800 \times 10^{-8}$ متر)؛ ذلك لأن معدل الطاقة الحركية متساو لجميع أنواع الجزيئات المكونة للغاز؛ لأنه تحت تأثير درجة الحرارة، لكن سرعة تحرك كل جزيء مرتبط بكتلته؛ ولهذا فإن قدرة فصل اليورانيوم لوحدة الانتشار الغازي تساوي جذر نسبة كتل جزيئات الغاز M_2 ($^{238}\text{UF}_6$) و M_1 ($^{235}\text{UF}_6$) وفق المعادلة الآتية:

$$(١,١٢) \quad \alpha\beta = \frac{V_8}{V_5}(UF_6) = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = 1.0042$$

نلاحظ أن هذه القيم صغيرة جداً، إلا أنه بالإمكان عند تكرار عملية التخصيب مرات عديدة الوصول إلى نسبة التخصيب المطلوبة.

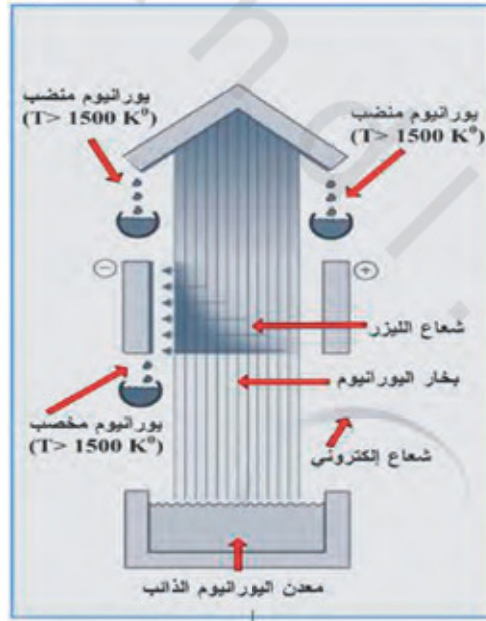
يوضح الشكل رقم (١,٦) وحدة تخصيب اليورانيوم بالانتشار الغازي، التي تتكون من مدخل الغاز المغذي UF_6 ، ومخرجين أحدهما لليورانيوم المخصب، والثاني لليورانيوم المنضب. ويساعد في عملية الفصل الضغط العالي للغاز عن طريق مكبسين لحث الجزيئات على اختراق الغشاء فتتفد جزيئات $^{235}UF_6$ الخفيفة نسبياً بسرعة أكبر من جزيئات $^{238}UF_6$ الثقيلة ($V_5 > V_8$). عند اختراق الغشاء لحوالي نصف كمية الغاز الداخل تُضخ هذه الكمية المخصبة قليلاً ثم تُكبس من جديد لتصبح جاهزة لدخول الوحدة الموالية إلى آخره، أما الغاز المنضب فيعود إلى مدخل الوحدة السابقة. تستهلك عملية تخصيب اليورانيوم كميات ضخمة من الطاقة لتشغيل الأعداد الكثيرة من المكابس وإزالة الحرارة من النظام.



الشكل رقم (١,٦). تخصيب اليورانيوم بالانتشار الغازي [٣٢].

(١,٤,٤) التخصيب بالليزر

تستغل طريقة تخصيب اليورانيوم بالليزر اختلاف مستويات طاقة تأيين أو تفكيك جزيئات نظير العنصر نفسه. وباستخدام الليزر يمكن تأيين أو تفكيك جزيئات نظير واحد داخل مجموعة من النظائر، وذلك بتحديد طاقة الإثارة بدقة لذلك النظير فقط. بعد ذلك تتم عملية فصل النظير المحدد بمساعدة حقل كهربائي وفق نوع شحنة الأيونات. يوضح الشكل رقم (١,٧) غرفة مفرغة لتخصيب اليورانيوم بالليزر. تحتوي هذه الوحدة على معدن اليورانيوم المنصهر الذي يتبخر عن طريق حزمة الإلكترونات، فتتصاعد الذرات وتمتص أشعة الليزر المحددة طاقتها لإثارة ذرات اليورانيوم ^{235}U فقط. عند ذلك تتأين ذرات اليورانيوم ^{235}U وتُسحب نحو القطب السالب للحقل الكهربائي لتجميعها، أما ذرات اليورانيوم الأخرى فتواصل طريقها إلى الأعلى وتصبح يورانيوماً منضباً.

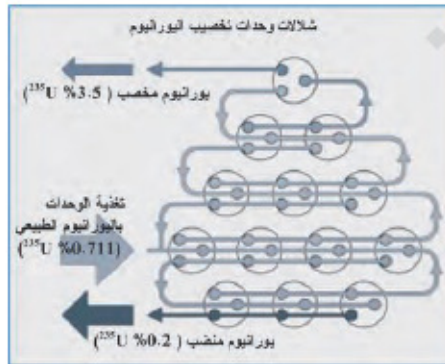


الشكل رقم (١,٧). تخصيب اليورانيوم بالليزر [٢٧].

أجرت الولايات المتحدة وفرنسا واليابان العديد من الأبحاث لتحسين طريقة التخصيب بالليزر، إلا أن الظروف الصعبة ودرجة الحرارة العالية لتبخير اليورانيوم ($T > 1500\text{ C}$) لم تسمح لطريقة التخصيب هذه من الخروج من المختبرات، والوصول إلى مرحلة التصنيع.

(١,٤,٥) تصميم محطات تخصيب اليورانيوم

لم تتجاوز طرائق تخصيب اليورانيوم مرحلة التجارب المخبرية إلا طريقتي الانتشار الغازي والطررد المركزي اللتين وصلتا إلى المرحلة التجارية. وتستعمل كل منهما غاز سداسي فلوريد اليورانيوم (UF_6) كمادة أولية، التي تصل إلى كل من المحطتين على شكل صلب في حاويات خاصة. بعد ذلك يتم تحويلها إلى الحالة الغازية برفع درجة الحرارة بدون المرور بالحالة السائلة (نقطة التسامي 0.54°C). أما قدرة الفصل لوحدات التخصيب بالانتشار الغازي فهي صغيرة جداً ($1,003$) عادةً، ولهذا تحتاج محطة التخصيب إلى حوالي 1400 وحدة تشتغل كلها مع بعضها لإنتاج اليورانيوم المخضب بنسبة $3-5\%$. لكن ميزة هذه المحطات أنها تصمم لإنتاج كميات كبيرة حوالي ($6 - 10 \text{ MSWU/Y}$)، أما الطاقة المستهلكة فهي تصل إلى حوالي (2400 Kwh/SWU). يوضح الشكل رقم (١,٨) مجموعة من وحدات تخصيب اليورانيوم بالانتشار الغازي.



الشكل رقم (١,٨). وحدات تخصيب اليورانيوم بالانتشار الغازي [٢٧].

لا يتجاوز عدد وحدات تخصيب اليورانيوم بطريقة الطرد المركزي عشرين وحدة للحصول على الخصوبة نفسها (٣-٥٪)، لكن الكميات المنتجة تكون أقل؛ ولهذا تصمم الوحدات على شكل شلالات متوازية يصل عددها إلى حوالي خمسين وحدة لإنتاج (1-1.5 MSWU/Y). أما الطاقة المستهلكة فتصل إلى حوالي (50 Kwh/SWU). ويوضح الشكل رقم (١,٩) مجموعة من الوحدات لأحد شلالات تخصيب اليورانيوم بالطرد المركزي.



الشكل رقم (١,٩). شلالات تخصيب اليورانيوم بالطرد المركزي [٢٦].

تنتج محطات تخصيب اليورانيوم بالانتشار الغازي حوالي ٤٠٪ من اليورانيوم المخضب المنتج اليوم لتصنيع الوقود النووي خاصة. وتستهلك هذه المحطات كميات كبيرة من الطاقة حوالي ٦٠ مرة ما تستهلكه محطات تخصيب اليورانيوم بالطرد المركزي، كما أنها لها منشآت ضخمة وتكلفة عالية. أما محطات الطرد المركزي فهي أصغر حجماً، ولها

مميزات عديدة من بينها قلة كميات الطاقة المستهلكة، ومرونتها الكاملة في تشغيل عدد الوحدات أو الشلالات، والتحكم في نسبة خصوبة اليورانيوم المنتج.

(١,٥) محطات تصنيع الوقود النووي

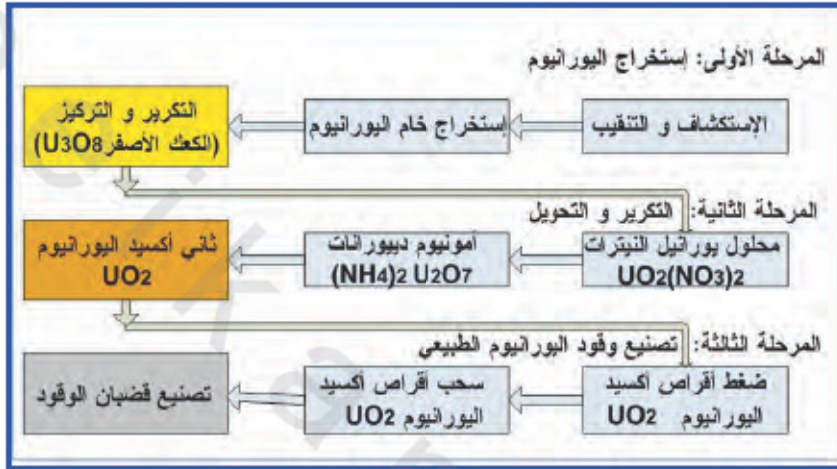
يحتوي الوقود النووي بشكل عام على أحد العنصرين الانشطاريين: اليورانيوم ^{235}U ، أو البلوتونيوم ^{239}Pu ، بالإضافة إلى اليورانيوم ^{238}U وقليل من المواد المساعدة الأخرى ليصبح على شكل مادة صلبة خزفية (سيراميك) قابلة لتحمل درجة حرارة عالية. وتستخدم المفاعلات النووية الحالية المنتجة للقوى الكهربائية ثلاثة أنواع من الوقود، أولها وقود اليورانيوم الطبيعي، وثانيها وقود اليورانيوم المخصب قليلاً (٣-٥٪)، وثالثها وقود خليط اليورانيوم والبلوتونيوم. يستعمل النوع الأول من الوقود في مفاعلات الجرافيت المبرد بالغاز (GCR)، ومفاعلات الماء الثقيل الكندي (CANDU). ويستعمل وقود النوع الثاني في مفاعلات الماء المضغوط (PWR) والماء المغلي (BWR) ومفاعل الماء ذي القنوات (RBMK)، أما وقود النوع الثالث فيستعمل في مفاعلات النيوترونات السريعة (FBR). وانتشر أخيراً استعمال هذا النوع من الوقود ليصل إلى حوالي ثلث وقود مفاعلات الماء الخفيف والمغلي من مفاعلات الجيل الثالث.

ير اليورانيوم المنتج من المنجم، كما سبق شرحه بمراحل التكرير والتنقية ثم التخصيب قبل أن يصل إلى محطات تصنيع الوقود. وترتكز عمليات تصنيع الوقود النووي على الرغم من تشابه بعضها على نوعية الوقود المنتج أساساً في هذه المحطات. كذلك تنتج هذه المحطات أنواعاً أخرى من الوقود النووي العالي الخصوبة؛ لاستخدامه في مفاعلات البحث العلمي، ومفاعلات الغواصات، وحاملات الطائرات.

(١,٥,١) تصنيع وقود اليورانيوم الطبيعي

لا تحتاج المادة الخام لتصنيع وقود اليورانيوم الطبيعي إلى مرحلة التخصيب، بل يستخدم اليورانيوم المركز (الكعك الأصفر U_3O_8) بعد تحويله إلى ثاني أكسيد اليورانيوم

UO_2 مباشرة لتصنيع هذا النوع من الوقود. يوضح الشكل رقم (١٠، ١) المراحل الأساسية التي يمر بها خام اليورانيوم لتصنيع وقود اليورانيوم الطبيعي.



الشكل رقم (١٠، ١). مراحل تصنيع وقود اليورانيوم الطبيعي [٣٣].

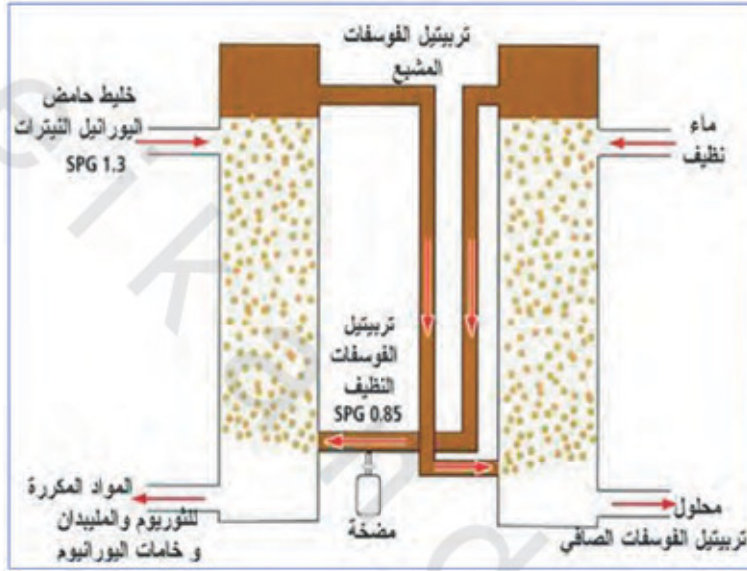
لقد سُرّحت المرحلة الأولى لتصنيع الوقود في بداية الفصل ، أما المرحلة الثانية فهي الأكثر تعقيداً وتحتوي على الخطوات الآتية :

أولاً : تكوين محلول يورانيل النيتريت ، وذلك بإذابة اليورانيوم المركز (الكعك الأصفر) في حامض النيتريك (HNO_3) .

ثانياً : إزالة الشوائب غير الذائبة من المحلول بالمرشحات ، ثم تنقيته بطريقة الاستخلاص بالمذيب باستخدام تريبتيل الفوسفات والماء ، كما هو موضح في الشكل رقم (١١، ١).

ثالثاً : ترسيب مواد المحلول باستخدام الأمونيوم الهيدوكسايد للحصول على الأمونيوم الديورانات $(NH_4)_2 U_2O_7$.

رابعاً: اختزال المنتج بالهيدروجين H_2 لإنتاج مسحوق ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) .



الشكل رقم (١١، ١). الاستخلاص بالمذيب [٣٣].

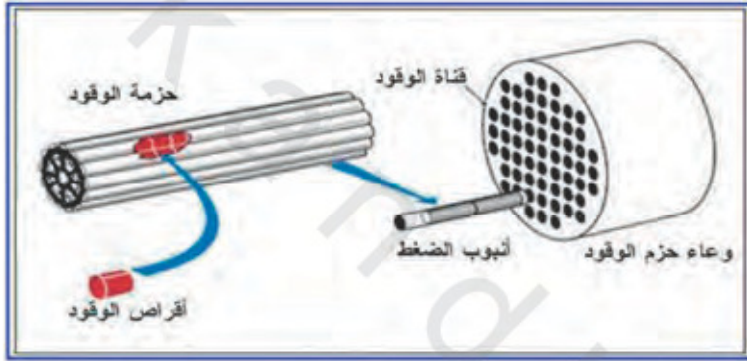
تختص المرحلة الثالثة بعمليات تصنيع الوقود، التي تحتوي على الخطوات الآتية:

أولاً: ضغط مسحوق ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) لتصنيع أقراص أسطوانة تفوق أبعادها بقليل أبعاد أقراص الوقود النهائي.

ثانياً: حرق هذه الأقراص في فرن عالي الحرارة لتكتسب الصلابة ويصبح لها تكوين خزفي.

ثالثاً: شحذ الأقراص وتنظيفها لتناسب أبعادها مع أبعاد أقراص الوقود المطلوب تصنيعه.

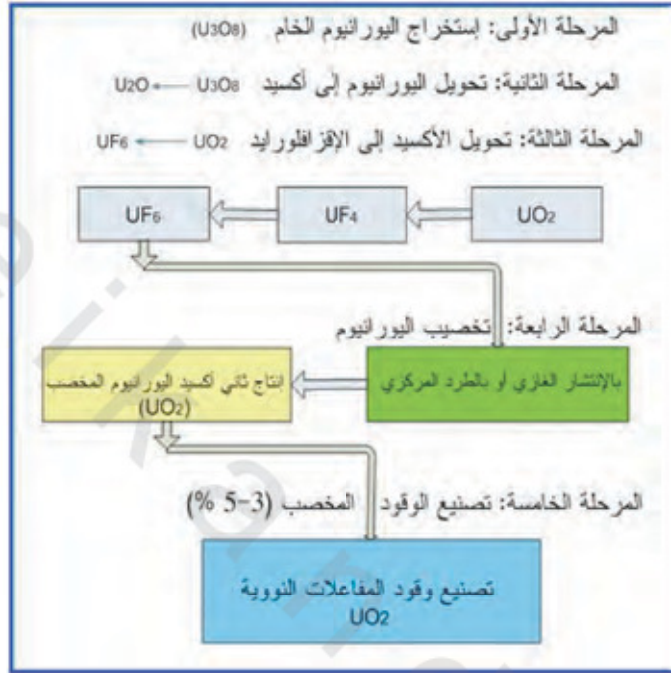
رابعاً: وضع هذه الأقراص داخل أنابيب الزركونيوم أو الحديد غير قابل للصدأ ثم قفله باللحام من الطرفين لتصبح أقلام الوقود. تُجمع بعد ذلك هذه الأقلام في حزم تتناسب أبعادها وعددها مع متطلبات نوع المفاعل. ويوضح الشكل رقم (١، ١٢) حزمة وقود اليورانيوم الطبيعي الخاصة بمفاعل الماء الثقيل (CANDU) وتحتوي هذه الحزمة على حوالي ٣٧ قلماً بطول نصف متر ووزن إجمالي يقارب ٢٠ كيلوجراماً.



الشكل رقم (١، ١٢). حزمة وقود اليورانيوم الطبيعي لمفاعل الماء الثقيل [٢٦].

(١، ٥، ٢) تصنيع وقود اليورانيوم المخضب (٣-٥٪)

يتميز وقود مفاعلات الماء الخفيف بنسبة خصوبة تتراوح بين ٣ و ٥٪ من اليورانيوم ^{235}U مما حتم إضافة مرحلتين تحويل ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) إلى غاز سداسي فلوريد اليورانيوم (UF_6)، ثم تخصيب اليورانيوم الطبيعي قبل مرحلة تصنيع الوقود. ويوضح الشكل رقم (١، ١٣) المراحل المهمة لتصنيع هذا النوع من الوقود.



الشكل رقم (١٣، ١). مراحل تصنيع وقود مفاعلات الماء الخفيف [٣٣].

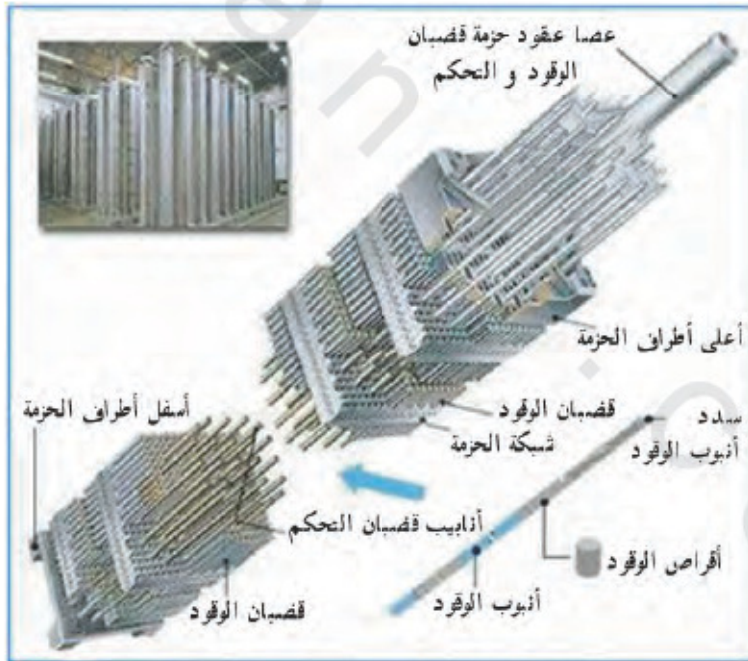
لا يُوجد اختلاف يُذكر بين مراحل البداية والنهاية لتصنيع وقود اليورانيوم الطبيعي ووقود اليورانيوم المخصب، إلا أن الأخير يحتاج إلى مرحلتين إضافيتين قبل مرحلة التصنيع الأخيرة. وتتمثل المرحلة الثالثة لتصنيع وقود مفاعلات الماء الخفيف في الخطوات الآتية:

أولاً: إنتاج رباعي الفلوريد اليورانيوم (الملح الأخضر UF_4) بمزج ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) بحامض الهيدروفلوريد (HF).

ثانياً: إنتاج غاز سداسي فلوريد اليورانيوم (UF_6) ليصبح قابلاً للتخصيب، وذلك عن طريق التفاعل الكيميائي لليورانيوم رباعي الفلوريد (UF_4) مع غاز الفلور (F_2).

أما مرحلة التخصيب فُشِّرت بالتفصيل في بداية هذا الفصل سواء كانت عن طريق الانتشار الغازي أو الطرد المركزي. بعد ذلك يُنتج ثاني أكسيد اليورانيوم المخضب وفق النسبة المطلوبة ثم تبدأ مرحلة إنتاج الوقود التي لا تختلف عن مرحلة إنتاج وقود اليورانيوم الطبيعي التي تعرضنا لشرحها سابقاً.

يوضح الشكل رقم (١,١٤) حزمتين لوقود اليورانيوم المخضب، إحداهما خاصة بمفاعلات الماء الخفيف المضغوط (PWR)، والثانية خاصة بمفاعلات الماء الخفيف المغلي (BWR). أما عدد الأقسام فهو يتراوح بين ١٧٧ و ٢٦٤ والطول بين ٤ و ٥ أمتار. ويوضح الشكل رقم (١,١٤) حزم وقود اليورانيوم المخضب.



الشكل رقم (١,١٤). حزمة الوقود المخضب [٣٩].

(١,٥,٣) تصنيع وقود خليط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم (MOX).

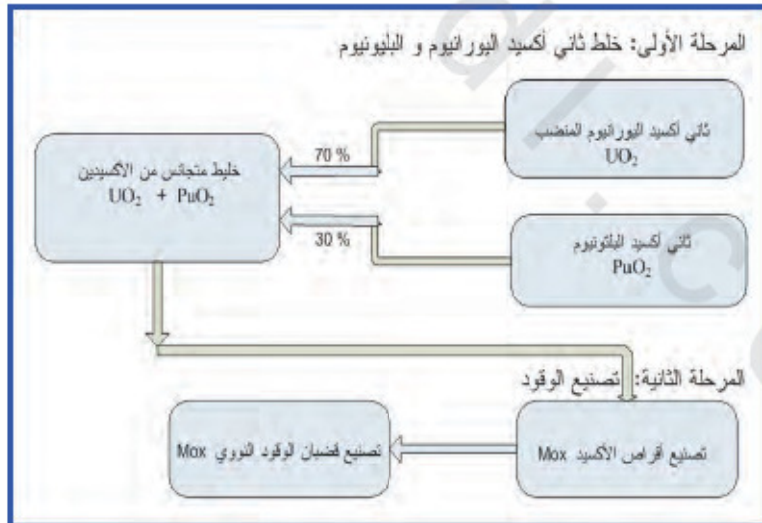
تتكون المادة الخام لصنع خليط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم (MOX) من ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) المنضب الناتج من ربيع عملية التخصيب، وثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2). ولا يوجد البلوتونيوم في الطبيعة، لكن يتم إنتاجه عن طريق تكرير الوقود المستهلك في المفاعلات النووية. ولأهمية هذا الموضوع سنخصص فصلاً من هذا الكتاب لتكرير الوقود المستهلك، وإنتاج مادة البلوتونيوم، واستخلاص اليورانيوم الذي لم يستهلك أيضاً وإعادة تدويرها من جديد إلى دورة الوقود النووي.

تحتوي عملية تصنيع الوقود (MOX) على مرحلتين كما هو موضح في الشكل

رقم (١,١٥) الآتي:

المرحلة الأولى: خلط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم.

المرحلة الثانية: تصنيع الوقود (MOX).



الشكل رقم (١,١٥). مراحل تصنيع الوقود النووي (MOX).

تتمثل المرحلة الأولى في خلط متجانس لثاني أكسيد اليورانيوم المنضب مع نسبة معينة من ثاني أكسيد البلوتونيوم. وعند الحصول على خليط الأكسيدين بنسبة الخصوبة المطلوبة، تبدأ المرحلة الثانية الخاصة بتصنيع الوقود. لا تختلف مرحلة تصنيع هذا النوع من الوقود عن مراحل تصنيع الوقود النووي السابقة الذكر، ولا داعي لإعادة شرحها.

يُوضح الشكل رقم (١,١٦) حزمة من أقلام الوقود لخليط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم. تحتوي هذه الحزمة على حوالي ٢٥٠ قلماً، ويتراوح طولها بين ٤ و ٥ أمتار، ويقارب وزنها ٢٠٠٠ كيلوجرام.



الشكل رقم (١,١٦). حزمة وقود خليط اليورانيوم والبلوتونيوم [٣٩].

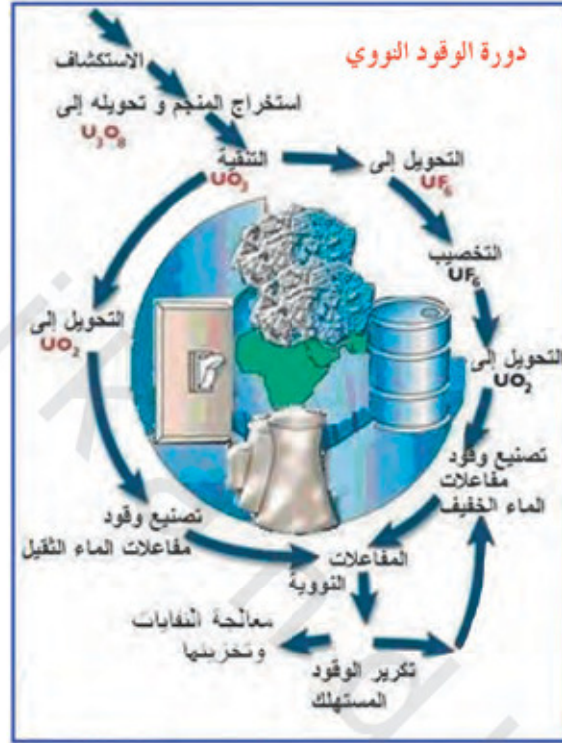
(١,٥,٤) أنواع الوقود النووي الأخرى

أكثر أنواع الوقود النووي استعمالاً هي الأنواع الثلاثة التي ذكرت، لكن بعض التطبيقات الخاصة تحتاج إلى أنواع مختلفة من الوقود، والمثال على ذلك وقود مفاعلات الأبحاث التي تتميز عادة بخصوبة عالية تفوق ٢٠٪.

ويُستخدم أحياناً اليورانيوم على شكل سبيكة معدنية عوضاً عن ثاني أكسيد اليورانيوم، وكذلك الحال بالنسبة لمفاعلات الغواصات وحاملات الطائرات التي تحتاج أيضاً إلى نسبة خصوبة عالية سواء أكان الوقود من اليورانيوم المخضب أم خليط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم (MOX) "موكس"، ذلك؛ لأنه كلما كانت خصوبة الوقود عالية، أمكن تصنيع مفاعل صغير الحجم.

(١,٥,٥) دورة الوقود النووي

تجدر الإشارة إلى أن المادة الأولية لتصنيع الوقود النووي من اليورانيوم ليست فقط هي خام اليورانيوم المنتج من المنجم، بل إن جزءاً كبيراً منها ناتج عن عملية تكرير الوقود المستهلك؛ وذلك لأن الاستهلاك الفعلي لليورانيوم الأصلي في الوقود قليل جداً. ولهذا، فإن الجزء الأكبر من اليورانيوم بعد عملية تكرير الوقود المستهلك، الذي سنخصص له الفصل الثالث في هذا الكتاب، يعود إلى مصنع الوقود من جديد. أما الوقود النووي الذي يحتوي على اليورانيوم ونظائر البلوتونيوم (موكس) فهو يعتمد أساساً على ناتج عملية تكرير الوقود المستهلك من يورانيوم وبلوتونيوم. ويوضح الشكل رقم (١,١٧) دورة الوقود النووي ابتداءً من خام اليورانيوم مروراً بمختلف مراحل التصنيع، ثم تكرير الوقود المستهلك، وإعادة الناتج إلى دورة الوقود من جديد.



الشكل رقم (١٧، ١). دورة الوقود النووي.

(١، ٦) تمارين

- ١- اذكر أهم أنواع مناجم اليورانيوم مع توضيح طريقة استخراج خام اليورانيوم من كل منها.
- ٢- اذكر أهم العمليات للحصول على الكعك الأصفر من خامات اليورانيوم.
- ٣- وضح باختصار مفهوم تخصيب اليورانيوم. وهل يمكن القيام بهذه العملية كيميائياً؟ ولماذا؟

٤- اشرح العوامل الأساسية لعملية تخصيب اليورانيوم الآتية :

(أ) عامل التخصيب.

(ب) عامل التنضيب.

(ج) عامل الفصل.

(د) مقياس شغل الفصل.

٥- اذكر طرائق تخصيب اليورانيوم الممكنة بدون تفصيل ، ثم اشرح باختصار مراحل الطريقتين الأكثر رواجاً اليوم لتخصيب اليورانيوم.

٦- اشرح باختصار أهم العمليات اللازمة لتحويل الكعك الأصفر إلى غاز إقزافلورايد (UF_6).

٧- اذكر مميزات كل من طريقتي تخصيب اليورانيوم بالانتشار الغازي والطررد المركزي.

٨- اذكر أهم أنواع الوقود النووي المستعمل اليوم موضحاً نوع المفاعل المناسب لكل منها.

٩- اذكر أهم مراحل تصنيع وقود الماء الخفيف ومفاعلاته.

١٠- أوجد كمية اليورانيوم الطبيعي اللازمة لإنتاج عشرة كليوجرامات من اليورانيوم المخصب بنسبة ٥٪ وعدد وحدات شغل الفصل لهذه العملية ، علماً أن نسبة اليورانيوم المنضب المتبقي تحتوي على نسبة ٠,٠٢٪ من اليورانيوم U^{235} .

١١- أعد حسابات التمرين السابق ، علماً أن المطلوب إنتاج عشرة كيلو غرامات من اليورانيوم المخصب بنسبة ٩٠٪.

١٢- وضح أهمية وقود خليط أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم في الحاضر والمستقبل.