الصناعات النووية (١)

د . محمد فاروق أحمد

الصناعات النووية هي صناعات ترتبط بانتاج النظائر المشعة واستخداماتها أو إستخدام الوقود الانشطاري القابل للانشطار في المفاعلات النووية لتوليد الطاقة ، وتشكل الصناعات المرتبطة بالمفاعلات النووية الجزء الأكبر من الصناعات النووية لأهميتها الاقتصادية لتوليد الكهرباء .

وتتضمن صناعات الطاقة النووية عددا هائلاً من الأنشطة الخاصة بالوقود الإنشطاري تعرف بدورة الوقود النووي وتبدأ هذه الدورة بالأعمال الجيولوجية الخاصة باستكشاف الخامات النووية كاليورانيوم والثوريوم ، ومن ثم فصلها وتنقيتها من الشوائب . يلي ذلك إثراء الوقود وتصنيعه ثم استخدامه في المفاعلات ، وانتهاءاً باعادة المعالجة للوقود المستهلك والتخلص من النفايات عالية الإشعاع المتلدة من هذه الصناعات ، شكل (١) .

سيتناول هذا المقال مراحل دورة الوقود النووي بدءاً من استكشاف الخامات النووية ـ اليورانيوم ـ حتى مرحلة انتاج الكعكة الصفراء ، وذلك كما يلي :

الاستكشاف

يوجد اليورانيوم في القشرة الأرضية في صورة أملاح ومعادن مختلطة تتخذ صوراً كيميائية مختلفة تتميز بألوان مميزة مثل الأسود والبني والبرتقالي للأكاسيد والأصفر للمعادن الفوسفاتية والأخضر لمركبات النحاس والرصاص واليورانيوم والأكسجين ، ويتم استكشاف اليورانيوم في الصخور الحاوية له بعد إجراء سلسلة من الدراسات والبحوث الجيولوجية التي تحدد التركيزات الاقتصادية لليورانيوم ـ ٠,٠٣٪ أو أكثر ـ باستخدام وسائل متنوعة منها المسح الجوي والمسح السطحي حيث تحدد التركيزات الاقتصادية إما بوساطة مجسات وميضية تحدد كثافة اشعاعات جاما المنبعثة من الأرض والناجمة عن تفكك نظائر سلسلة اليورانيوم مثل البسموت ـ ٢١٤ و الرصاص ـ ٢١٤ ، وإما بوساطة تحديد المناطق التي يزيد فيها تركيز غاز الرادون سواء كانت مياه جوفية أو أراضي سطحية .

كذلك يمكن استكشاف خامات اليورانيوم بوساطة حفر عدد من الثقوب الإسطوانية الرأسية لدراسة تركيزات الخام في الأعماق المختلفة وقياس نسبة تركيز غاز الهيليوم ـ ٤ (^{4}He) إلى الأرجون ـ ٣٦ (^{36}Ar) الموجود في الطبيعة كغاز مستقر حيث أنه كلما زادت تلك النسبة دل ذلك على تركيز خام اليورانيوم أو الثوريوم في الطبقة .

الاستخراج

يستخرج اليورانيوم من القشرة الأرضية بالطرق التالية :

● الحفرة المكشوفة

تستخدم هذه الطريقة في حالة وجود الطبقة المحتوية على خام اليورانيوم على السطح مباشرة أو تحتها على أعماق غير سميكة . وتتلخص في عمل عدد من الحفر الاسطوانية بفاصل حوالي ٢٠ متر لتحديد تركيز الخام وعمق طبقته وامتداداتها ثم إزالة الطبقة الفقيرة بالخام بواسطة جرافات للوصول للطبقة عالية التركيز ، بعدها يتم تجميع الصخور الغنية بالخام قرب المطاحن لطحنها .

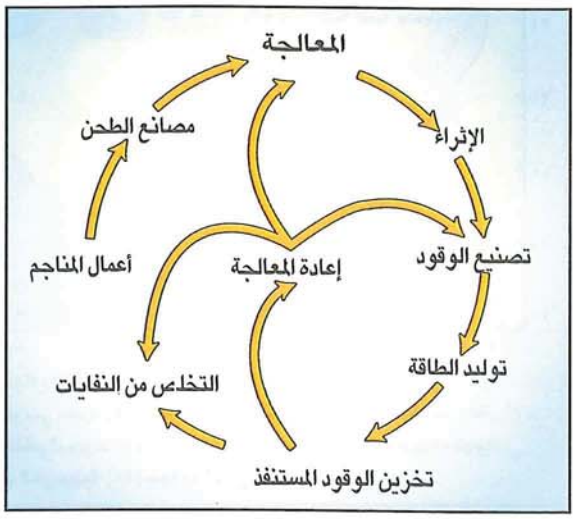
● المنجم العميق

يمكن أن تتواجد خامات اليورانيوم على أعماق كبيرة من سطح الأرض ـ تزيد على ٢٠٠٠ متر ـ وفي هذه الحالة تحفر أنفاق للعمق اللازم للوصول إلى الطبقات الغنية بالخام وتنقل الخامات إلى سطح الأرض لتخزينها في منطقة الطحن . وفي هذه الحالة ينبغي الإبقاء على أجزاء من الطبقات لتعمل كدعائم تمنع الانهيارات . وفضلاً عن ذلك قد تنجم عن الانفاق العميقة مخاطر التعرض لتركيزات عالية من غاز الرادون الأمر الذي يتطلب ضرورة وجود تهوية ملائمة لتخفيض تركيز هذا الغاز الذي يمثل مخاطر على الإنسان .

● الإذابة والترسيب

يتم في هذه الطريقة حفر عدد من الثقوب الإسطوانية في الطبقة الأرضية المحتوية على الخام تبعد حوالي ١٥ ـ ٢٠ مترا بعضها عن بعض ، ويحقن محلول لإذابة أملاح اليورانيوم في هذه الطبقة خلال بعض هذه الثقوب . ويتحرك المحلول الذائب من أملاح اليورانيوم إلى الثقوب الأخرى حيث يسحب منها بوساطة مضخات . وتتميز هذه الطريقة ـ لا زالت تحت الاختبار ـ بالآتي :

* التخلص من نفقات حفر المناجم أو رفع الطبقة السطحية ، ونفقات نقل وتخزين كميات هائلة من الصخور أو التربة المحتوية على الخام ، والتخلص من عمليات



● شكل (١) دورة الوقود النووي.

جرش وطحن الخام وخفض التلوث البيئي لشديد الذي تحدثه هذه العمليات .

* إمكانية الحصول على اليورانيوم من خامات منخفضة الدرجة (التركيز) .

* خفض المخاطر التي يتعرض لها عمال لمناجم وأهمها المخاطر الإشعاعية ومخاطر لإنهيار .

* من جانب آخر تتلخص سلبيات هذه لطريقة فيما يلي :

* إمكانية حدوث تلوث كيميائي أو إشعاعي للمياه الجوفية بسبب الحقن والإذابة .

* الحصول على نسبة محدودة من معادن اليورانيوم الموجودة في الطبقة (بما لايزيد على ٥٠٪) وبقاء الباقي دون ستخراج في التربة .

طحن واستخلاص الكعكة

بعد تجميع الصخور المحتوية على اليورانيوم تجري عليها عدة عمليات في مرافق يطلق عليها مطاحن اليورانيوم حيث تنتهي هذه العمليات بالحصول على المادة المعروفة باسم الكعكة الصفراء (Yellow Cake) ، وفي هذه المطاحن تغذي كسارات ومجارش ضخمة بالصخور المخزنة التي جمعت من المناجم حيث تخضع لعمليات جرش وطحن للحصول على حبيبات ناعمة نسبياً من الخامات . وبعد الطحن تحرق هذه الحبيبات في أفران عند درجات حرارة معينة للتخلص من المواد العضوية الموجودة في الحبيبات ، وبعد عمليات الحرق تطحن الحبيبات من جديد للحصول على مسحوق شديد النعومة تمهيداً لإستخلاص معادن اليورانيوم منه .

يخضع المسحوق بعد ذلك لعملية يطلق عليها عملية الإذابة والترسيب (Leaching) ، وقد تكفي هذه العملية في بعض الحالات (الخامات) للحصول على الكعكة الصفراء. إلا أنه في معظم الأحيان يلزم إجراء أي من العمليات الكيميائية الأخرى للحصول على الكعكة الصفراء ، مثل : الإستخلاص بالتبادل الأيوني والاستخلاص بالمذيبات العضوية .

● الاستخلاص

تتلخص عملية الاستخلاص بالإذابة والترسيب شكل (٢) في إضافة حامض قوي مثل حامض الكبريتيك أو مادة قلوية شديدة لإذابة أملاح اليورانيوم الموجودة في المسحوق (الطحين) الناتج عن طحن الحبيبات بعد الحرق وذلك تبعاً لنوع هذه الأملاح . فإذا كانت الأملاح في صورة ثالث أكسيد اليورانيوم (UO_3) فإنها تعالج بإضافة حمض الكبريتيك فتتكون كبريتات اليورانيل (Uranyl Sulphate) تحت ظروف الضغط الجوي العادي وفقاً للمعادلة :

$$UO_2 + H_2SO_4 \longrightarrow UO_2SO_4 + H_2O$$

أما إذا كان اليورانيوم في صورة البتشبلند ـ أكاسيد يورانيوم مختلفة مختلطة مع بعضها ـ فإنه يجب أكسدته أولاً بإضافة حمض النيتريك أو أملاح الحديد إلى المسحوق قبل إضافة حامض الكبريتيك . وبالنسبة للأملاح القلوية لليورانيوم كالكربونات مثلا فإنه يفضل معالجتها ببعض المحاليل الأخرى مثل كربونات الأمونيوم أو كربونات الصوديوم الهيدروجينية تحت ظروف الضغط الجوي العادي وعند درجة حرارة تتراوح بين ٧٥ إلى ٨٠م وذلك للحصول على مركب ثلاثي كربونات اليورانيل الصوديومي وفقا للمعادلة :

$$UO_3 + Na_2CO_3 + 2NaHCO_3 \longrightarrow Na_4[UO_2(CO_3)_3] + H_2O$$

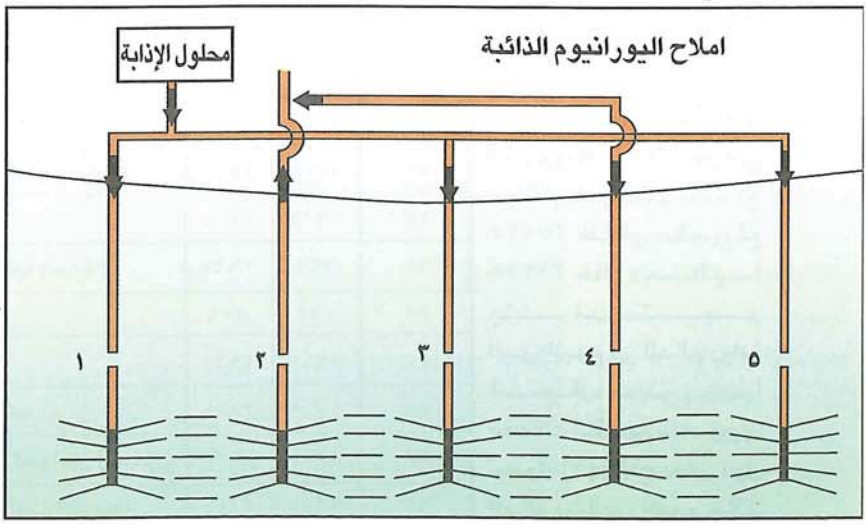
ويتم بعد ذلك فصل الملح اليورانيومي المتكون من المحلول باستخدام راتنجات مناسبة تودي إلى الحصول على اليورانيوم في صورة مركبات كبريتية أو كربونية ، إلا أن هذه الطريقة المعروفة بطريقة الاستخلاص بالتبادل الأيوني يقل استخدامها بالمقارنة بطريقة الفصل بالمذيبات العضوية ، التي تتكون بدورها من خطوتين تتمثل الخطوة الأولى في استخلاص اليورانيوم بمساعدة وسيط استخلاص وذلك في مذيب عضوي معين . وتتمثل الخطوة الثانية في نزع اليورانيوم الموجود في طور مائي وذلك في صورة مركب اليورانيل

$$[UO_2(SO_4)_3]^{-4}_{org} + 5Na_2CO_3 \longrightarrow [UO_2(CO_3)_3]^{4}_{aq} + 2H_2O + 2CO_2 + 3Na_2SO_4$$

● إنتاج الكعكة الصفراء

تنتج الكعكة الصفراء ـ حوالي ـ ٦٥٪ يورانيوم طبيعي ـ بطرق مختلفة وفقاً لنوع المركب المترسب بعد عملية الإذابة والترسيب أو الاستخلاص بالإذابة أو بالتبادل الأيوني . فعند الحصول على ثلاثي كربونات اليورانيل الصوديومي $Na_4[UO_2(CO_3)_3]$ يتم معالجته بإضافة محلول قلوي مثل هيدروكسيد الصوديوم حيث ينتج ثنائي يورانات الصوديوم $Na_2U_2O_7$ وفقا للمعادلة :

$$2Na_4[UO_2(CO_3)_3] + 6NaOH \longrightarrow Na_2U_2O_7 + 6Na_2CO_3 + 3H_2O$$



● شكل (٢) إستخراج اليورانيوم بالإذابة.

أما إذا كان الراسب هو كبريتات اليورانيل UO_2SO_4 فإنها تعالج بإضافة محلول حمضي لإنتاج ثنائي يورانات الأمونيوم $(NH_4)_2U_2O_7$ وذلك وفقا للتفاعل :

$$2UO_2SO_4 + 6NH_3 + 3H_2O \longrightarrow (NH_4)_2U_2O_7 + 2(NH_4)_2SO_4$$

وهكذا يكون الناتج هو ثنائي يورانات الصوديوم في الحالة الأولى ، وثنائي يورانات الأمونيوم في الحالة الثانية . ويعرف كلا المركبين باسم الكعكة الصفراء التي تتخذ اللون الأصفر الزاهي . ويتحول كلا المركبين بالتسخين إلى أكسيد اليورانيوم الأسود U_3O_8 ، فيتحول ثنائي يورانات الصوديوم إلى هذه الأكسيد بالتسخين حتى درجة حرارة ١٢٥ ـ ١٧٥°م في حين يتحول ثنائي يورانات الأمونيوم إلى الأكسيد U_3O_8 عند تسخينها حتى ٧٥٠°م . لهذا السبب تطلق بعض المراجع على أكسيد اليورانيوم من النوع U_3O_8 اسم الكعكة الصفراء ، وهي تسمية غير مناسبة حيث يتخذ هذا الأكسيد الأخير اللون الأسود في حين أن الكعكة الصفراء تتميز بلونها الأصفر الزاهي . وتجمع الكعكة الصفراء (ثنائي يورانات الصوديوم أو الأمونيوم) في براميل من الصلب سعة الواحد ٥٥ جالونا ، وتنقل بعد ذلك لإجراء عمليات التكرير والتنقية .

مؤخرات مطاحن اليورانيوم

يحيط بمطاحن اليورانيوم ـ عادة ـ عدد من البرك والأحواض الكبيرة والأنفاق التي تستخدم للتخزين يطلق عليها اسم مؤخرة المطحنة . وتستقبل هذه المرافق جميع النفايات المشعة المتخلفة عن عمليات الطحن والمعالجات الكيميائية . ومن أهم هذه النفايات الراديوم ٢٢٦ ونواتج التفكك الإشعاعي الأخرى لليورانيوم . لذا تخضع المؤخرات عادة للمراقبة الإشعاعية الصارمة لتأمين البيئة المحيطة من التلوث . وفضلا عن المواد المشعة تصرف السوائل المختلطة بالأحماض والقلويات المختلفة إلى هذه البرك والأحواض . لذلك تخضع هذه المرافق عند الإنشاء لمتطلبات هندسية وكيميائية محددة بحيث تقاوم جميع الظروف المناخية والزلزالية والكيميائية بما لا يدع مجالا لتسرب هذه المواد الخطرة للبيئة تحت أية ظروف .

اليورانيوم من ماء البحر

من المعلوم أن مياه البحار والمحيطات تتضمن تركيزا ضعيفا من اليورانيوم يصل إلى ٠,٠٠٣ جزء في المليون وأن الطمي المترسب في قيعان البحار والمحيطات يحتوي على اليورانيوم بتركيز يصل إلى حوالي جزء في المليون . وبذلك يقدر اليورانيوم الطبيعي الموجود في المحيطات بحوالي ٤٠٠٠ مليون طن . وقد بدأت عمليات استخراج اليورانيوم من ماء البحر منذ أكثر من عقدين . ولهذا الغرض يستخدم أكسيد التيتانيوم الهيدروجيني (HTO) لإستخلاص اليورانيوم من ماء البحر ، ثم يضاف بعد ذلك محلول من كربونات الأمونيوم المائية ($NH_4CO_3H_2O$) لفصل اليورانيوم . ومنذ السبعينيات أنشأت اليابان أول مصنع تجريبي لإنتاج اليورانيوم من ماء البحر حيث تم إنتاج كمية منه ، إلا أن تكاليف الإنتاج بهذه الطريقة كانت باهظة حيث بلغت ١٩٤٠ دولارا للكيلو غرام الواحد ، وهي قيمة كبيرة بالمقارنة بالسعر الحالي لليورانيوم . كذلك يوجد اليورانيوم بتركيزات كبيرة نسبياً في بعض المعادن وبخاصة الفوسفات كما يوجد بتركيزات أقل في الفحم الحجري . وتقوم بعض الدول في الوقت الحالي باستخراج اليورانيوم من الفوسفات بسعر منافس .

اقتصاديات إنتاج اليورانيوم

زادالطلب العالمي على اليورانيوم بشكل ملحوظ خلال السبعينات من هذا القرن واندفعت العديد من الدول التي تتوفر فيها خاماته بتركيزات عالية بإنتاج كميات كبيرة منه . وتراوح سعر اليورانيوم خلال السبعينيات حول ٨٠ دولارا للكيلو غرام الواحد . ومع نهاية السبعينات ومطلع الثمانينيات تجاوز إنتاج اليورانيوم الطلب العالمي تجاوزا هائلا ، فبدأت أسعاره في الانهيار حيث وصلت إلى حوالي ٤٠ دولار للكيلو غرام الواحد خلال الثمانينيات ثم استمرت الأسعار في الانخفاض إلى أن وصلت إلى أقل قليلاً من عشرين دولارا للكيلو غرام الواحد حالياً . لذا خفضت جميع الدول المنتجة لليورانيوم إنتاجها حتى أصبح المنتج منه سنويا في الفترة الأخيرة أقل من الكمية اللازمة لتشغيل المفاعلات النووية التي تعمل في العالم . ويتم استخدام الفرق اللازم حاليا من الاحتياطات المخزونة منه ، ففي عام ١٩٨٨م بلغ إنتاج اليورانيوم في العالم ٦٠٠٠٠ طن بينما لم يتجاوز الطلب في نفس العام ٥١٠٠٠ طن أي بفائض في الانتاج بلغ حوالي ٩٠٠٠ طن ، وفي عام ١٩٩٢م بلغ لطلب العالمي على اليورانيوم اللازم لتشغيل المفاعلات النووية ٥٦٨٠٠ طن في حين لم يتجاوز الانتاج ٣٥٥٢٥ طناً، أي بنقص بلغ ٢١٢٧٥ طنا . وحاليا يترقب منتجو اليورانيوم في العالم زيادة أسعاره حتى يزيدوا معدلات إنتاجهم منه . ويبين جدول (١) إنتاج بعض دول العالم من اليورانيوم خلال عامي ١٩٨٨ ، ١٩٩٢م .

الدولة	الانتاج السنوي بالطن		
	١٩٨٨	١٩٩٢	نسبة الخفض ٪
استراليا	٣٥٣٢	٢٣٤٦	٣٤
بلغاريا	٨٥٠	١٠٠	٨٨
كندا	١٢٢٩٣	٩٢٥٠	٢٥
تشيكوسلوفاكيا (سابقا)	٢٧٠٠	١٥٣٩	٤٣
فرنسا	٣٣٩٤	٢١٢٧	٣٧
المانيا الشرقية (سابقا)	٣٩٦٥	٢٣٢	٩٤
المجر	٥٧٦	٤١٢	٢٨
ناميبيا	٢٩٦٥	١٦٩٢	٤٣
جنوب أفريقيا	٣٨٠٠	١٧٦٩	٥٤
دول الاتحاد السوفيتي (السابق)	١٥٠٠٠	٨٥٠٠	٤٣
الولايات المتحدة الأمريكية	٥٠٤٠	١٨٠٨	٦٤

جدول (١) إنتاج بعض دول العالم من اليورانيوم خلال عامي ١٩٨٨ و ١٩٩٢م.