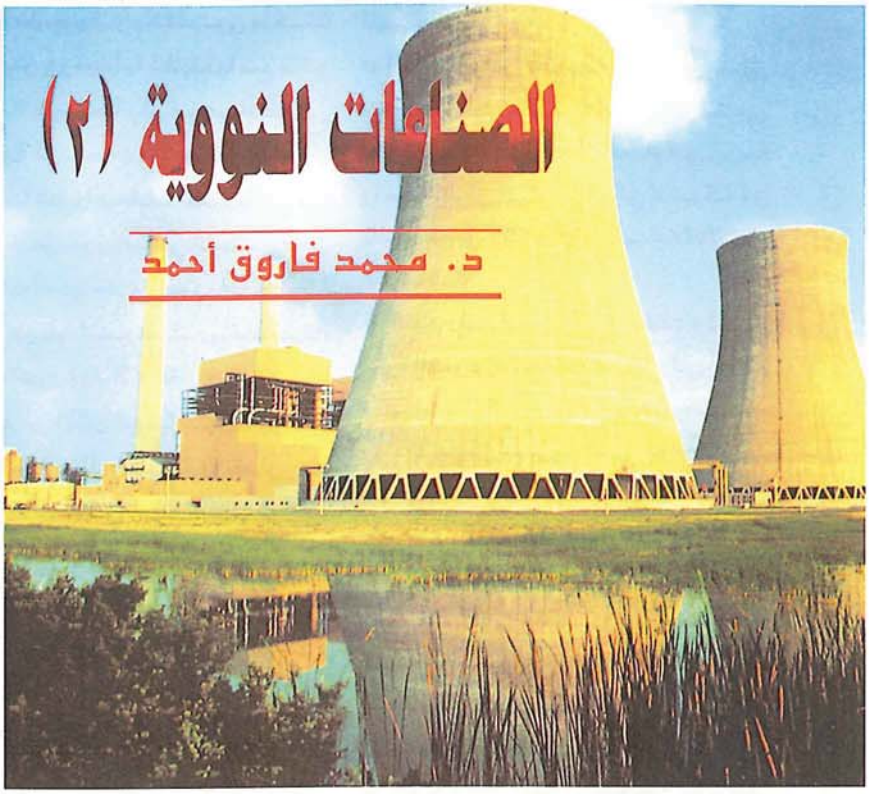
الصناعات النووية (٢)

د. محمد فاروق أحمد



لا شك أن الصناعات النووية لا تقف عند إستكشاف واستخراج ومعالجة الخامات النووية ـ اليورانيوم في هذه الحالة ـ التي تم تناولها سابقاً ولكن يلي ذلك عدة خطوات صناعية تشمل معالجة الكعكة الصفراء بتحولها إلى أكسيد اليورانيوم (U_3O_8) ومن ثم إثراءها لإنتاج الوقود النووي اللازم لتوليد الطاقة ، يلي ذلك تخزين الوقود المستهلك وإعادة معالجته .

من جانب آخر تتضمن الصناعات النووية إنتاج النظائر المشعة للأغراض السلمية المختلفة في الطب والزراعة والصناعة وغيرها . ويمكن تفصيل الخطوات المتبقية من الصناعات النووية فيما يلي :

معالجة الكعكة الصفراء

لا تستخدم الكعكة الصفراء مباشرة كوقود نووي للمفاعلات وإنما تخضع لعدد كبير من المعالجات والعمليات التي تهدف إلى تنقيتها من الشوائب وتحويلها إلى الصورة المطلوبة للوقود النووي . ويطلق على المصانع التي تقوم بهذه العمليات والمعالجات مرافق التحويل (Conversion Facilities) أو مرافق المعالجة (Processing Facilities) .

وفي هذه المرافق تخضع الكعكة الصفراء لعمليات طرد مركزي وتجفيف تهدف إلى تنقيتها من بعض الشوائب ثم تخضع بعدها لعمليات معالجة حرارية لتحويل ثنائي اليورانات (الصوديومية أو الأمونيومية) إلى أكسيد اليورانيوم الأسود (U_3O_8) الذي يخضع لبعض المعالجات الحرارية لتحويله إما إلى ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) ، الذي يمكن استخدامه كوقود لبعض أنواع المفاعلات التي تعمل باليورانيوم الطبيعي ، أو إلى سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6) لإجراء عملية إثراء اليورانيوم الطبيعي باليورانيوم ٢٣٥ أو البلوتونيوم ٢٣٩ لإنتاج عناصر الوقود للمفاعلات التي تعمل باليورانيوم المثري .

وتتمثل عملية التنقية في فصل الشوائب الموجودة في أكسيد اليورانيوم الأسود (U_3O_8) مثل البورون والكادميوم ومركبات الكلور وعدد آخر من العناصر الأرضية النادرة . ومما ييسر عمليات تنقية اليورانيوم أن هذا العنصر يتميز بخاصيتين فريدتين تمكن من فصله بدرجة نقاوة عالية وهما :

ـ أن اليورانيوم يكوّن بسهولة مركبات يمكن استخلاصه منها بالمذيبات العضوية غير القابلة للامتزاج بالماء .

ـ أن اليورانيوم يكوِّن مركبات معقدة عضوية متعادلة كهربائيا وقابلة للذوبان مع مذيب أو مع عامل مساعد آخر .

وهناك طرائق مختلفة لتنقية اليورانيوم منها طريقتان تستخدمهما الولايات المتحدة الأمريكية وتقومان على الإستخلاص بالمذيبات هما :

ـ استخلاص نترات اليورانيل ($UO_2(NO_3)$) من المحلول المائي باستخدام مذيبات عضوية مؤكسدة مثل الإيثير ثنائي الإيثيل (Diethyl Ether) والفوسفات ثلاثي البوتايل (Tributyl Phosphate) وغيرهما .

ـ استخدام بيروكسيد اليورانيوم المائي ($UO_4 \cdot 2H_2O$) الذي يترسب من المحاليل ضعيفة الحمضية لأملاح اليورانيل بوساطة بيروكسيد الهيدروجين . وبعد عمليات التنقية يتم الحصول على اليورانيوم في صورة نقية لأكسيد اليورانيوم الأسود (U_3O_8) .

الإثراء وصناعة الوقود

يعد أكسيد اليورانيوم الأسود (U_3O_8) بعد التنقية المادة الأساسية لصناعة الوقود النووي ، وهو يحول إما إلى ثاني أكسيد يورانيوم (UO_2) أو سادس فلوريد يورانيوم (UF_6) قبل عملية الإثراء ، ومن أسباب تحويل أكسيد اليورانيوم إلى سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6) ما يلي :

ـ يتخذ مركب سادس فلوريد اليورانيوم الأطوار الثلاثية للمادة وهي الصلبة والسائلة والغازية بسهولة شديدة . فعند درجة حرارة الغرفة يكون المركب في حالته الصلبة عند الضغط العادي . وعند الوصول إلى درجة حرارة ٦٤°م وضغط يساوي ٢٢ باسكال يتبخر المركب ويتخذ الصورة الغازية ، وهي الصورة المثالية لعمليات المعالجة والإثراء بالطرق المختلفة . وفضلا عن ذلك يتسامى المركب عند درجة حرارة حوالي ٥٦,٥°م .

ـ الفلور الموجود في الطبيعة لا يوجد له

سوى نظير وحيد هو الفلور ١٩ بذلك يكون سادس فلوريد اليورانيوم هو المركب الوحيد لليورانيوم الذي لا يعتمد فيه وزنه الجزيئي إلا على نظير اليورانيوم ذاته وبذلك تسهل عمليات الفصل لنظائر اليورانيوم ، وهناك طريقتان لتحويل أكسيد اليورانيوم الأسود (U_3O_8) إلى سادس فلوريد اليورانيوم هما :

- **الفلورة الجافة** (Dry hydrofluor process) .
- **التحويل بالمذيبات (العملية الرطبة)** .

وللاختصار سوف يكتفي بشرح العملية الأولى باختصار شديد وتتمثل في الآتي :

طحن أكسيد اليورانيوم الأسود وتحويله إلى مسحوق ناعم للغاية ، ثم يدفع المسحوق إلى مفاعل كيميائي تتراوح درجة الحرارة داخله بين ٥٥٠ إلى ٦٥٠°م حيث يختزل الأكسيد بواسطة الهيدروجين ليكوّن ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) بني اللون الذي ينتقل إلى مفاعلين متتابعين لإحداث الفلورة عند درجة حرارة حوالي ٥٠٠ ـ ٥٤٠°م ، ويتكون رابع فلوريد اليورانيوم وفقاً للمعادلة :

$$UO_2 + 4HF \xrightarrow{520\ ^\circ c} UF_4 + 2H_2O$$

يتميز رابع فلوريد اليورانيوم بأنه ملح أخضر اللون غير قابل للتطاير ونقطة غليانه عالية (تبلغ حوالي ٩٥٠°م) . أما في المفاعل الثاني فيخلط رابع فلوريد اليورانيوم من جديد مع غاز الفلور (F) ليتكون سادس فلوريد اليورانيوم وفقاً للتفاعل :

$$UF_4 + F_2 \longrightarrow UF_6$$

● إثراء اليورانيوم

يحتوي اليورانيوم الطبيعي على نظيرين هما اليورانيوم ٢٣٨ ، واليورانيوم ٢٣٥ . وتبلغ نسبة اليورانيوم ٢٣٨ في اليورانيوم الطبيعي ٩٩,٢٨٪ في حين تبلغ نسبة (وفرة) اليورانيوم ٢٣٥ حوالي ٠,٧٢٪ . ولا يعد اليورانيوم ٢٣٨ من المواد الإنشطارية وإنما يصنف ضمن المواد القابلة للانشطار حيث أنه لا ينشطر إلا بالنيوترونات السريعة ، أما اليورانيوم ٢٣٥ فينشطر بالنيوترونات البطيئة والحرارية وكذلك السريعة . لذلك فإنه يصنف من المواد الإنشطارية . وحيث أن احتمال امتصاص النيوترون الحراري (أو البطيء) أكبر أضعافاً مضاعفة من إحتمال إمتصاص النيوترون السريع في اليورانيوم تستخدم معظم أنواع المفاعلات وقوداً يحتوي على نسبة عالية من اليورانيوم ٢٣٥ أو البلوتونيوم ٢٣٩ ، وهما من المواد الإنشطارية . وتعرف عملية زيادة نسبة اليورانيوم ٢٣٥ في اليورانيوم عن النسبة الطبيعية أو عملية إضافة البلوتونيوم ٢٣٩ إلى اليورانيوم الطبيعي بعملية الإثراء . وبالنسبة للمفاعلات العاملة حاليا في العالم يستخدم وقود من اليورانيوم المثري بنسب اثراء تتراوح بين ٢ إلى ٤٪ في حين يلزم لتشغيل بعض أنواع المفاعلات (كمفاعلات الحرارة العالية والمفاعلات الولودة السريعة) نسب إثراء تصل إلى ٩٣٪ .

وتقوم عملية الإثراء على استخدام الفوارق الطفيفة بين كتلة جزيء سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٨ ، وسادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ فنسبة كتلة الجزيء الأول إلى الثاني تبلغ (٢٣٨+٦×١٩) / (٢٣٥ +٦×١٩) = ١,٠٠٤٢٨٩ .

وتستخدم جميع مصانع الفصل هذا الاختلاف الطفيف بين الكتل أو الاختلاف بين خصائص إمتصاص الأشعة بين الجزيئين . وهناك عدد من الطرق المستخدمة في عمليات الفصل والإثراء ، أكثرها انتشاراً ما يلي :

* **طريقة الانتشار الغازي :** وتستخدم في كل من الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي السابق وفرنسا . وتقوم الطريقة على إختلاف القدرة الإنتشارية خلال غشاء (حاجز) خاص لكل من غاز سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ ، وسادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٨ حيث يزيد معامل الانتشار للغاز الأخف قليلاً عنه للغاز الأثقل . ويتكون الحاجز المستخدم (الغشاء) من سبيكة معينة من عدد من العناصر (كالفضة والخارصين وغيرهما) يحتوي على عدد هائل من المسام الضيقة (حوالي ٩١٠ مسام لكل ١سم٢) . وحيث أن طاقات جزيئات الغاز (E) تتناسب طردياً مع درجة الحرارة T ، (E = KT) ، ودرجة الحرارة واحدة للغازين . وحيث أن الطاقة الحركية تساوي نصف الكتلة في مربع السرعة تكون سرعات جزيئات سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ أعلى بفرق طفيف من سرعات جزيئات سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٨ ، وقد بلغ معامل الإثراء لمرحلة الإثراء الواحدة بطريقة الانتشار الغازي ١,٠٠٢ وليس ١,٠٠٤ المحسوبة وذلك لعدة أسباب لا يتسع المقال لذكرها (معامل الفصل هو نسبة وفرة اليورانيوم ٢٣٥ في اليورانيوم بعد وقبل المرحلة) .

* **الإثراء بالطرد المركزي للغازات :** وينتشر استخدامه في كل من المملكة المتحدة وهولندا وألمانيا . وتتميز هذه العملية باستهلاك طاقة أقل كثيراً من الطاقة المستهلكة لعملية الانتشار الغازي (حوالي ٥٪ من الطاقة فقط) .

* **الإثراء بالفوهات الحادة :** تستخدم هذه الطريقة في بعض الدول كالبرازيل وتقوم على دفع خليط من سادس فلوريد اليورانيوم والهيدروجين أو الهليوم بسرعات عالية للغاية عبر مسار (جدار) منحن . ويتم فصل النظير بوضع فوهة حادة في هذا المسار لا يتجاوز سمكها ٢٠ ميكرومتر حيث يكون تركيز اليورانيوم ٢٣٥ القريب من الجدار مختلفا إختلافا طفيفاً عن تركيزه بعيدا عن الجدار .

* **عملية الفصل بالليزر :** وهي أحدث طرق الفصل ، وقد بدأ تنفيذها في بعض الدول كالولايات المتحدة واليابان وغيرها ، وتقوم على إثارة ذرات اليورانيوم ٢٣٥ في جزيء سادس فلوريد اليورانيوم دون ذرات اليورانيوم ٢٣٨ في الجزيء المتكون من سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٨ ، وذلك باستخدام حزمة محددة الطاقة من أشعة الليزر . ويسهل بالتالي فصل الجزيئات التي أثيرت ذراتها عن تلك التي لم تثار .

● إنتاج الوقود النووي

لا يستخدم سادس فلوريد اليورانيوم كوقود للمفاعلات إلا في نوع واحد منها هو مفاعل الطور الغازي المتجانس ، الذي لا يستخدم كمفاعل لتوليد الطاقة الكهربائية وإنما كمفاعل أبحاث . لذلك يتم تحويل سادس فلوريد اليورانيوم ، بعد إثرائه ، إلى الصورة المستخدمة لصناعة الوقود النووي وهي ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2

في غالبية المفاعلات .

وخلال عمليات تحويل سادس فلوريد اليورانيوم المثري إلى ثاني أكسيد اليورانيوم توجه العناية الكاملة إلى تلافي تجمع الكتلة الحرجة من الوقود النووي المثري منعا لحدوث أي إنفجار نووي تلقائي عند تجمع هذه الكتلة . ويتم ذلك بمعالجة كتل محدودة من الوقود واستخدام أحجام صغيرة من الأوعية التي تجمع فيها كتل الوقود النووي مع استخدام السموم النيوترونية (أي المواد المصاصة للنيوترونات مثل البورون والكادميوم) وفضلا عن ذلك توضع كتل الوقود داخل أوعية مدرعة لامتصاص إشعاعات جاما المنطلقة من اليورانيوم ٢٣٥ (حيث لا يصدر اليورانيوم ٢٣٨ سوى كميات ضئيلة للغاية من هذه الإشعاعات) .

وهكذا ينقل سادس فلوريد اليورانيوم من مصنع الإثراء في أوعية من الصلب صغيرة الحجم وتتحمل ضغوطاً عالية وتكون المادة (UF6) في حالتها الصلبة . ويتم تحويل سادس فلوريد اليورانيوم إلى ثاني أكسيد اليورانيوم في مصنع إعادة التحويل كالآتي :

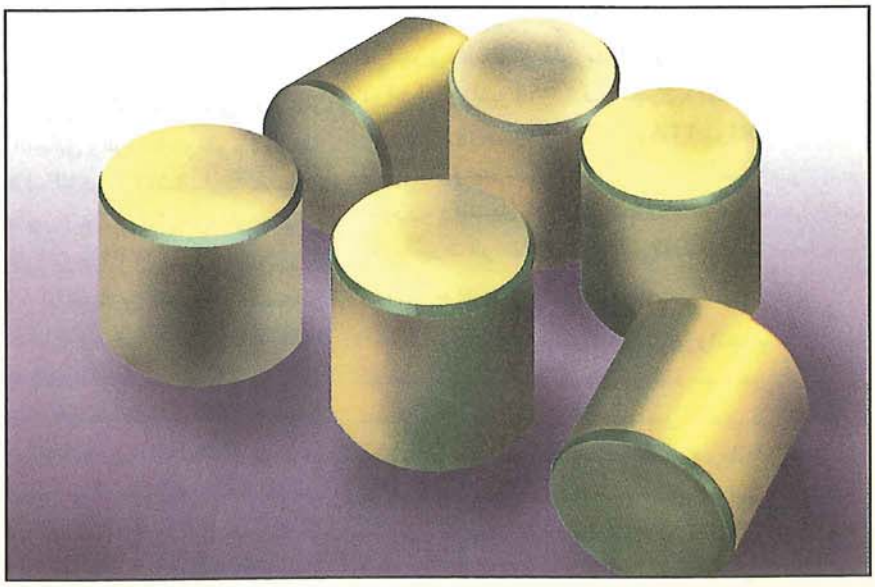
- وضع أوعية الصلب الاسطوانية الصغيرة المحتوية على سادس فلوريد اليورانيوم المثري في فرن حتى يتسامي (UF6)ويتحول إلى الصورة الغازية.
- سحب غاز سادس فلوريد اليورانيوم خلال الماء حيث يتفاعل معه ويكون فلوريد اليورانيل (UO_2F_2) كمحلول مائي .
- خلط محلول فلوريد اليورانيل الناتج من الخطوة السابقة مع ماء الأمونيا فيترسب اليورانيوم في صورة ثنائي يورانات الأمونيوم ($(NH_4)_2U_2O_7$) .
- تجفيف الراسب وتحميصه عند درجات حرارة عالية حتى يتكون أكسيد اليورانيوم الأسود (U_3O_8) المثري .
- طحن الأكسيد حتي يصبح مسحوقاً ناعماً ثم اختزاله بواسطة الهيدروجين ليتكون ثاني أكسيد اليورانيوم المثري (UO_2) . وتجدر الإشارة إلى أنه يحدث خلال هذه السلسلة من العمليات فقد في اليورانيوم المثري يبلغ حوالي ٠,٥٪ .

يجهز الوقود النووي - عادة - في صورة أقراص من ثاني أكسيد اليورانيوم المثري حيث يطحن الأكسيد إلى درجة نعومة عالية للغاية ثم يخلط مع مادة عضوية لاصقة تساعد على تماسكه ، ويستخدم لهذا الغرض كحول البولي فينيل (Polyvinyl Alchol) ثم يكبس المسحوق مع المادة اللاصقة بواسطة مكبس هيدروليكي في صورة أقراص تعرف بالأقراص الخضراء ثم تعرض لدرجة حرارة عالية - حوالي ١٥٥٠ - ١٧٠٠أم - في وجود الهيدروجين لمدة ٢٤ ساعة حتى يتلبد القرص وتصل كثافته إلى حوالي ٩٠ - ٩٨٪ من الكثافة المطلوبة . تخضع الأقراص بعد ذلك لعمليات صقل داخل أسطح إسطوانية ثم تغسل وتجفف بينما تخضع لسلسلة طويلة من الاختبارات الميكانيكية والحرارية لتأكيد جودتها . وتجدر الإشارة إلى أن أحجام الأقراص تختلف باختلاف عنصر الوقود ونوع المفاعل المستخدمة فيه . وعموماً يتراوح قطر القرص بين ٨,٣٠ و ١٠,٢٧٤مم . وتشكل قاعدة القرص السفلية والعلوية بحيث تتكون فجوة صغيرة بين كل قرص والذي يعلوه ، وذلك لاستيعاب نواتج الانشطار عند بدء تشغيل المفاعل واستخدام الوقود ولتوفير حيز فاصل بين سطح القرص الإسطواني وسطح الغلاف الذي يحتويه ، حتى لا يتشوه سطح القرص بسبب الاختلاف في معدلات توليد الحرارة وسريانها . ويبين شكل أقراص الوقود الجاهزة للاستخدام .

● تغليف أقراص الوقود

تغلف أقراص الوقود - قضبان الوقود النووي - بأغلفة اسطوانية مصنوعة من سبيكة يطلق عليها سبيكة الزركونيوم ، وتتمثل أهمية الغلاف في منع تآكل الأقراص عند إحتكاكها بمادة المبرد في المفاعل ، واستيعاب التغيرات في حجم القرص وتوفير سطح جيد التوصيل لنقل الحرارة إلى المبرد . ويجب أن تحقق مادة الغلاف جميع هذه المتطلبات فضلاً عن عدم تأثرها بالتشعيع بالنيوترونات الناتجة عن الانشطارات النووية وعدم تغير خصائصها به . كذلك يجب أن تتميز مادة الغلاف بمقطع عرضي (أي احتمال) صغير لامتصاص النيوترونات الحرارية حتى لا تنخفض كثافة هذه النيوترونات داخل المفاعل ، وبمقاومة عالية للتآكل .

وقد استخدم الصلب غير القابل للصدأ (صلب ٣٠٤) كمادة غلاف وما زال مستخدما في بعض المفاعلات المبردة بالصوديوم المنصهر . إلا أنه نظراً لارتفاع المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات في الصلب فإنه لا يفضل كمادة للغلاف . ويعد البريليوم (نقطة انصهاره ١٢٨٠أم) و الزركونيوم (نقطة انصهاره ١٨٤٥أم) من الفلزات التي تتحمل درجات حرارة عالية دون انصهار . لذلك يفضل



● أقراص الوقود النووي .

أنواع المفاعلات	الأبعاد بالملليمتر وفقا لعدد قضبان الوقود			
	٩×٩	٨×٨	١٥×١٥	١٦×١٦
١ ـ مفاعلات الماء المغلي				
ـ قطر القرص	٩,٠٥٥	١٠,٢٧٤	ـ	ـ
ـ قطر الغلاف	١٠,٧٧٠	١٢,٢٩٤	ـ	ـ
ـ سمك الجدار	٠,٧٦٧٢	٠,٨٨٩	ـ	ـ
٢ ـ مفاعلات الماء المضغوط				
ـ قطر القرص	ـ	ـ	٩,١	٨,٣
ـ سمك الجدار	ـ	ـ	٠,٦	٠,٦

● جدول (١) الأبعاد الهندسية لأقراص وقضبان الوقود لبعض المفاعلات.

الزركونيوم لعمل الغلاف حيث تخلط نسبة صغيرة للغاية من كل من الكروم والنيكل والحديد لتكوين سبيكة الزركونيوم المستخدمة حالياً لتغليف أقراص الوقود في مفاعلات الماء الخفيف والماء المضغوط. ويحتاج تصنيع هذه السبيكة وتنقية الزركونيوم من الشوائب الموجودة فيه مثل الهافنيوم وغيره إلى عمليات فصل كيميائية وإلى توفر صناعات فلزية متطورة. ويتم إعداد الغلاف في صورة قضيب اسطواني بالقطر والطول المطلوبين. ويبين جدول (١) الأبعاد الهندسية لأقراص الوقود والقضبان لبعض أنواع المفاعلات.

وبعد إعداد الغلاف الاسطواني (القضيب) بالأبعاد اللازمة يتم لحام أحد طرفيه ثم يخضع لسلسلة من الفحوص والاختبارات للتأكد من صلاحيته وعدم حدوث أي تسرب للغازات منه. بعد ذلك يركب في الطرف الملحوم للقضيب زمبرك سفلي ويوضع في آلة اللحام وترص أقراص الوقود بداخله ثم يركب فوقها الزمبرك العلوي. وقبل لحام الطرف العلوي يفرغ القضيب تماماً من الهواء ويملأ بغاز الهليوم الخامل تحت ضغط معين يتوقف على نوع المفاعل الذي سيستخدم القضيب فيه.

والهدف من وجود زمبركين أحدهما علوي والآخر سفلي هو حصر أقراص الوقود متلامسة بين الزمبركين وعدم السماح بتحركها داخل القضيب. أما سبب تفريغ القضيب من الهواء واستبداله بالغاز الخامل (الهليوم) فهو منع حدوث تأكسد لثاني أكسيد اليورانيوم الذي يمكن أن يتأكسد بسهولة في وجود الأكسجين وعند درجات الحرارة داخل المفاعل النووي.

وبعد التأكد من سلامة القضيب وعدم وجود أي تسرب منه يوضع في حمام من خليط من حمض النيتريك وحمض الهيدروفلور ثم يعرض بعد إخراجه من الحمام لبخار ماء تحت ضغط شديد فتتكون عليه طبقة خارجية رقيقة للغاية مقاومة للتآكل.

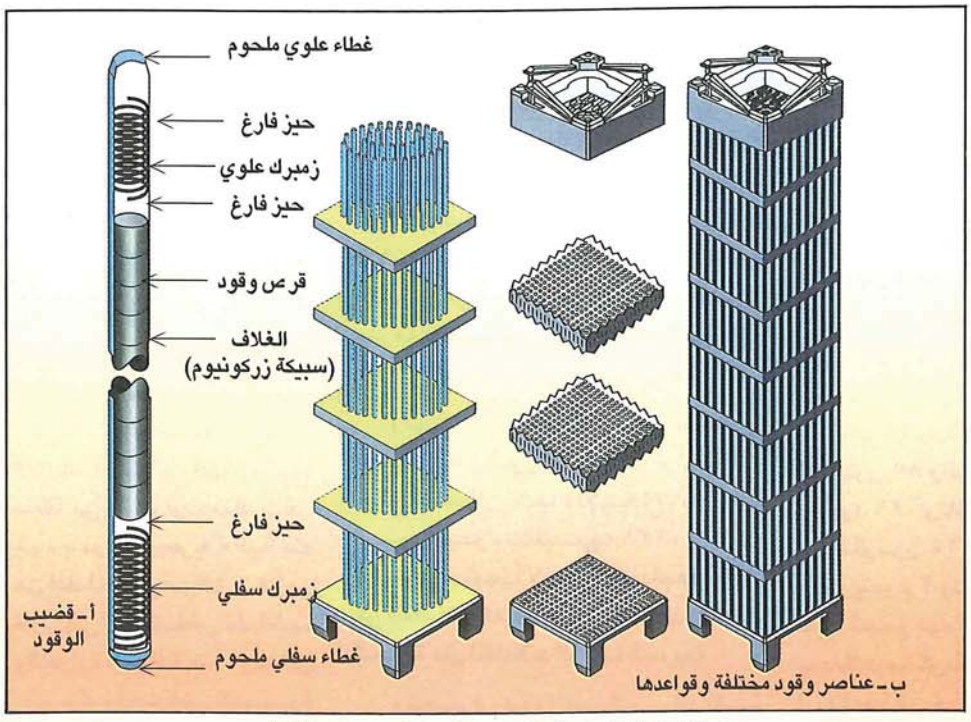
● تجميع قضبان الوقود

تجمع قضبان الوقود في مجموعات يطلق علي الواحد منها مصطلح عنصر (مجمع) الوقود. ويضم العنصر الواحد عدداً من قضبان الوقود المتوازية والمتوزعة في شبيكة (نظام) هندسي معين شكل (١). وفي أغلب الأحيان تكون الشبيكة تربيعية وتتضمن عددا من القضبان (٨ × ٨ أو ٩ × ٩ أو ١٥ × ١٥ أو غيرها) يعتمد على نوع المفاعل. وعند شحن المفاعل النووي بعناصر الوقود النووي ومكونات التشغيل الأخرى (عناصر التهدئة للنيوترونات والتبريد وعناصر التحكم والسيطرة) يصبح المفاعل النووي جاهزا للتشغيل.

توليد الطاقة

تتولد الطاقة في المفاعلات النووية نتيجة انشطار نوى اليورانيوم أو البلوتونيوم. فانشطار نواة واحدة يتولد عنه طاقة مقدارها ٣,٢ × ١٠$^{-١١}$ جول وفي مفاعلات القدرة العاملة حالياً (باستثناء المفاعلات الولودة السريعة) تستخدم النيوترونات الحرارية الناتجة عن تهدئة (تخفيض سرعة) النيوترونات السريعة الناتجة عن الانشطارات النووية لشطر نوى اليورانيوم ٢٣٥ أو البلوتونيوم ٢٣٩ الموجود في الوقود النووي المثري. وعند انشطار جميع نوى (ذرات) جرام واحد من اليورانيوم ٢٣٥ تتولد كمية من الطاقة تبلغ حوالي ٨,٢ × ١٠^{١٠} جول (أي حوالي ٢,٣ × ١٠^{٤} كيلو واط. ساعة).

ولإيضاح مدى ضخامة الطاقة المتولدة عن إنشطار نوى جرام واحد من اليورانيوم يكفي ذكر أن نفس كمية الطاقة المتولدة من هذا الجرام تكافىء الطاقة المتولدة عند حرق حوالي ٣ طن من الفحم أو حوالي ٢ طن من النفط.



● شكل (١) قضيب الوقود، وعناصر (مجمعات) الوقود.

وتولد الطاقة في مفاعلات تختلف باختلاف المبردات والمهدئات كما يلي:

- المفاعلات المبردة بالغاز.
- مفاعلات الماء الخفيف.
- مفاعلات الماء المضغوط.
- مفاعلات الماء المغلي.
- مفاعلات الماء الثقيل.
- المفاعلات الولودة السريعة.

الوقود المستهلك وإعادة المعالجة

مع مرور الوقت تستهلك المادة الإنشطارية (اليورانيوم ٢٣٥ أو البلوتونيوم ٢٣٩) الموجودة في أقراص وقضبان الوقود (باستثناء المفاعلات الولودة السريعة) ، وتتناقص بالتدريج لدرجة يصعب معها الاستمرار في تشغيل المفاعل والحصول منه على الطاقة بالقدرة المقننة . عندئذ يلزم استبدال عناصر الوقود المستهلك بأخرى جديدة تحتوي على نسبة الإثراء المطلوبة . وعموماً تختلف كمية الطاقة التي تنتجها عناصر الوقود باختلاف نوع المفاعل إلا أنه يمكن القول أن الطن الواحد من اليورانيوم المثري ينتج في المتوسط حوالي ٤٠ ميغا واط . ساعة قبل أن يصبح مستهلكا (يمكن إنتاج نفس كمية الطاقة بحرق ما يزيد على ١٦٠٠٠ طنا من الفحم الحجري الجيد) أو ما يزيد على ٨٠٠٠٠ برميل من النفط وبالنسبة لمفاعل نووي بقدرة ١٠٠٠ ميغا واط يتم استبدال ثلث كمية الوقود سنوياً وتخزن عناصر الوقود المستهلك بجوار المفاعل مباشرة إلى أن يتم إعادة معالجتها .

تخزين الوقود المستهلك

عند إخراج عناصر الوقود من المفاعل تكون شديدة الإشعاع بسبب وجود كميات هائلة من نواتج الانشطار المشعة فيها . وبفعل هذا النشاط الاشعاعي الهائل تتولد كميات هائلة من الحرارة . لذلك تنقل عناصر الوقود بسرعة وبطريقة آلية عند إخراجها من المفاعل إلى مرافق تخزين قريبة لتخزن إلى أن ينخفض نشاطها الاشعاعي والحرارة المتولدة عنه . وتتمثل هذه المرافق في برك وأحواض كبيرة وعميقة من الماء حيث يقوم الماء مقام الدرع الإشعاعي فيمتص الإشعاعات الصادرة من العناصر كما يقوم بعمليات التبريد والتبديد للحرارة . ويبقى الوقود المستهلك في هذه الأحواض والبرك مدة لا تقل عن خمسة أشهر ، وفي معظم الأحيان تزيد المدة عن ذلك كثيرا حيث تصل أحيانا إلى مدة تتراوح بين سنتين وسبع سنوات . وبعد مرور المدة المقننة ينقل الوقود إلى مصانع إعادة المعالجة أو إلى مرافق التخزين أو مرافق التخلص من النفايات . وعموماً فإنه بعد تخزين عناصر الوقود لمدة عامين يمكن نقلها من البرك والأحواض وتخزينها مدة أخرى في الهواء العادي داخل مخازن مدرعة مع توفير التبريد اللازم للهواء داخلها . ففي ألمانيا الغربية مثلا يتم إحتواء عناصر الوقود في حاويات من الصلب ذات جدران سميكة ، يبلغ ارتفاع الحاوية ستة أمتار وقطرها متران . وتقوم هذه الحاوية مقام وعاء النقل والدرع المصاص للإشعاعات المنبعثة ، وتتوفر بها قنوات غير مستقيمة للتهوية ونقل الحرارة .

إعادة المعالجة

يحتوي الوقود المستهلك ـ عادة ـ على خليط من المواد أو المادة القابلة للانشطار والمواد الانشطارية المتولدة فضلا عن الكميات الهائلة والمختلفة من النظائر المشعة الناتجة عن الانشطار . وبالنسبة لغالبية المفاعلات تبلغ نسب هذه المواد حوالي ٩٥٪ من اليورانيوم ٢٣٨ وحوالي ٥٪ من البلوتونيوم ٢٣٩ واليورانيوم ٢٣٥ الذي لم يستهلك وبعض نواتج الإنشطار شديدة الإشعاع والتي لم تتفكك بعد خلال مدة التخزين في البرك أو الأحواض نظرا لطول عمرها النصفي (من هذه النظائر السيزيوم ١٣٧ والاسترونشيوم ٩٠ وغيرها) .

وتهدف عمليات إعادة المعالجة عموما إلى فصل كل من اليورانيوم والبلوتونيوم عن نواتج الانشطار شديدة الإشعاع ، ثم فصل اليورانيوم بنظيريه ٢٣٨ ، ٢٣٥ عن البلوتونيوم تمهيداً لإعادة استخدام هذه المواد في المفاعلات العاملة أو في مفاعلات الأجيال الجديدة مثل المفاعلات الولودة السريعة .

وتعرف هذه المعالجات باسم بيوركس(PUREX) أي استرجاع البولوتونيوم واليورانيوم بالإستخلاص (Plutonim and Uranium Recovery by Extraction) ويوجد في الوقت الحالي عدد من منشآت ومرافق إعادة المعالجة في كل من الولايات المتحدة الأمريكية وبريطانيا وفرنسا وهولندا وألمانيا وبعض دول أوربا الشرقية .

وتجدر الإشارة إلى أن عدد منشآت ومرافق إعادة المعالجة الموجودة حاليا في العالم لا تكفي لإعادة معالجة كميات الوقود المستهلك الناتجة عن تشغيل المفاعلات الحالية . فعلى سبيل المثال بلغت قدرة مصانع إعادة المعالجة عام ١٩٨٦م بخلاف المصانع في الاتحاد السوفيتي السابق ـ ١٢٠٠ طنا في حين بلغ حجم الوقود المستهلك في نفس العام ٣٣٠٠ طناً، ورغم زيادة معدلات إستهلاك الوقود حتى عام ١٩٩٦م إلا أن معدلات إعادة المعالجة لم تتغير كثيرا لذلك توجد الآن كميات هائلة من الوقود المستهلك مخزنة انتظارا لعمليات إعادة المعالجة .

وعموما تستخدم عمليات بيوركس لإعادة معالجة الوقود المستهلك في كافة أنواع المفاعلات رغم اختلاف عناصر الوقود فيها . وتنقسم عمليات بيوركس إلى ثلاث مراحل (عمليات) فرعية هي :

● التجهيز

تضمن عمليات هذه المرحلة تفكيك عناصر الوقود وتقطيع القضبان إلى قطع صغيرة لا يتجاوز طول الواحدة ٥سم وذلك في أحواض خاصة . يصب بعد ذلك حمض النيتريك المركز الساخن على قطع القضبان فيذوب الوقود النووي المستهلك في صورة محلول وتنفصل قطع أغلفة الزركونيوم عنه . تجمع قطع الأغلفة في سلال الإذابة . وخلال عملية الإذابة تنطلق كميات كبيرة من الغازات المشعة مثل الكربتون ٨٥ والزينون ١٣٣ ، واليود ١٣١ واليود ١٢٩ وثاني أكسيد الكربون المكون من الكربون ١٤ المشع والأكسجين ، والتريتيوم ٣ (نظير مشع للهيدروجين) حيث تجمع هذه الغازات وتطلق إلى البيئة بمعدلات محكومة خلال مداخن عالية يصل إرتفاعها إلى حوالي ٢٠٠ متر فوق سطح الأرض . بعد ذلك ينقى المحلول الناتج عن

الإذابة بوضعه في أجهزة طرد مركزي أو بترشيحه خلال أغشية خاصة ، ثم يخضع المحلول بعد ذلك للتحليل الاشعاعي لتحديد جميع النظائر المشعة الموجودة فيه وتركيزاتها . وعموماً يحتوى المحلول بعد التنقية على كل من اليورانيوم والبلوتونيوم وجميع نواتج الإنشطار (عدا النواتج الغازية) أما الأجسام الصلبة والتي تتضمن أجزاء عناصر الوقود الفلزية وقطع أغلفة الزركونيوم والحمأة المتكونة عن الترشيح وغيرها فإنها تجمع وتحفظ حيث تعامل كنفايات مشعة متوسطة المستوى الإشعاعي .

● الإستخلاص

يخضع محلول الوقود المستهلك في مصنع الاستخلاص لعدد من عمليات الفصل والاستخلاص تتمثل باختصار في الآتي : يضاف حمض النيتريك (بتركيز ٣م) حتى يصل تركيز اليورانيوم في المحلول إلى حوالي ٢٤٠ ـ ٣٠٠ غرام لكل لتر . يضاف للمحلول خليط من الفوسفات ثلاثي البيوتيل (Tributyl Phosphate) بنسبة ٣٠٪ والكيروسين أو البروبان المهدرج . وتهدف هذه العملية لفصل كل من اليورانيوم والبلوتونيوم في طور عضوي وذلك باستخدام أعمدة ذات مرشحات خاصة . وخلال هذه العملية والمسماه بالدورة الأولى يفصل كل من اليورانيوم والبلوتونيوم وتبقى معظم نواتج الانشطار في الطور المائي ليتم فيما بعد تركيزها واستخلاص الأحماض منها ومعالجتها كنفايات مشعة سائلة .

أما اليورانيوم والبلوتونيوم المفصولان في الطور العضوي فإنهما يخضعان لعمليات إختزال بواسطة عامل مختزل مثل الهيدرازين أو غيره أو لعمليات معالجة كهروكيميائية تؤدي في النهاية إلى تحويل البلوتونيوم الرباعي (Pu-IV) إلى بلوتونيوم ثلاثي (Pu - III) ، غير قابل للذوبان في الطور العضوي . بذلك يتم فصل اليورانيوم عن البلوتونيوم باستخدام حامض نيتريك مخفف (٠,٠١ مول) . وهكذا تؤدي دورة الاستخلاص الأولى إلى فصل محلول الوقود إلى ثلاثة . محاليل مائية منفصلة هي محلول اليورانيوم ومحلول البلوتونيوم ومحلول نواتج الانشطار .

ويتم فصل النواتج (كالنبتونيوم والتكنشيوم وغيرها) من محاليل نترات اليورانيل ونترات البلوتونيوم خلال دورتي فصل لاحقتين يتم خلالهما إعادة أكسدة البلوتونيوم الثلاثي إلى بلوتونيوم رباعي وذلك باستخدام أكاسيد النيتروجين أو بالطرق الكهروكيميائية . وخلال الدورات الثلاثية يتم استخلاص كل من البلوتونيوم واليورانيوم بنسبة تصل إلى ٩٨ ـ ٩٩٪ إلا أنهما يكونان مختلطين بنسب ضئيلة من الشوائب . بعد ذلك يخضع كل من اليورانيوم والبلوتونيوم كل على حدة لعمليات تنقية مشابهة للعمليات التي تتم في مصانع المعالجة التي تتميز بمعايير وقاية اشعاعية أخف كثيراً من المعايير المطبقة في الدورات الثلاثية المذكورة وذلك لوجود نواتج الانشطار شديدة الاشعاع ، وعموما تجري جميع عمليات إعادة المعالجة والاستخلاص عند درجات حرارة لا تزيد عن ٣٠ أم وتحت ضغط يقل قليلا عن الضغط الجوي لضمان عدم انتشار المواد المشعة ، وتتم جميع العمليات آليا بالتحكم عن بعد ، وفي غرف خاصة لا يقل سمك جدرانها عن ١ متر من الخرسانة المسلحة تحقيقاً لمتطلبات الحماية الإشعاعية .

● عمليات المؤخرة

تنتهي عمليات بيوركس بالحصول على محلول نترات اليورانيل شديدة التركيز ومحلول نترات البلوتونيوم التي يقل تركيزها عن ٢٥٠ غرام بلوتونيوم لكل لتر. وتبدأ عمليات معالجة هذه المحاليل بعد ذلك بهدف تنقيتها من الشوائب .

معالجة محاليل اليورانيوم والبلوتونيوم

بعد الحصول على محاليل نقية لكل من اليورانيوم والبلوتونيوم تنتهي عمليات إعادة المعالجة وترسل هذه المحاليل من جديد إلى مصانع المعالجة لمعالجتها وتجهيزها للاستخدام المناسب كوقود . فإذا كانت نسبة اليورانيوم ٢٣٥ في محلول اليورانيوم قريبة من النسبة الطبيعية أو أعلى منها فإنه يخضع من جديد لعمليات تحويل إلى سادس فلوريد اليورانيوم وعمليات إثراء لاستخدامه كوقود جديد ، أما إذا كانت نسبة اليورانيوم ٢٣٥ أقل من النسبة الطبيعية (يورانيوم مستنفد) فإنه يخزن لاستخدامه كمادة أولية في المفاعلات الولودة السريعة أو للأغراض الأخرى .

أما البلوتونيوم فيتم ترسيبه في صورة اكسالات البلوتونيوم التي تحول بعد ذلك إلى ثاني أكسيد البلوتونيوم ليخلط مع ثاني أكسيد اليورانيوم غير المثري لاستخدامه وقوداً لمفاعلات الماء الخفيف (دون عمليات إثراء حيث أن البلوتونيوم مادة إنشطارية بديلة لليورانيوم ٢٣٥) . كذلك يخلط ثاني أكسيد البلوتونيوم مع نسبة ضئيلة من ثاني أكسيد اليورانيوم غير المثري ويستخدم كوقود في المفاعلات الولودة السريعة .

إنتاج النظائر المشعة

يمثل إنتاج النظائر المشعة نسبة محدودة للغاية من الصناعات النووية . وتنتج النظائر المشعة الصنعية إما بقذف نظائر مستقرة بجسيمات نووية كالنيوترونات أو الجسيمات المشحونة كالبروتونات والديوترونات وجسيمات ألفا وغيرها ، وإما باستخلاصها من نواتج الانشطار من المفاعلات النووية ، فعلى سبيل المثال ينتج الكوبلت ٦٠ المشع بوضع كتلة معينة من الكوبلت ٥٩ الفلزي المستقر داخل لب المفاعل النووي لتتعرض للتدفق النيوتروني . وعند إمتصاص نواة الكوبلت ٥٩ لنيوترون فإنها تتحول إلى الكوبلت ٦٠ وينطلق في نفس اللحظة فوتون جاما كالتفاعل :

$$^{59}_{27}Co + n \longrightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma$$

ويتم إنتاج العشرات العديدة من النظائر المشعة في المفاعلات النووية بهذا الأسلوب .

وهناك عدد آخر من النظائر المشعة التي يتم استخلاصها من نواتج الانشطار المتبقية في المفاعل بعد استهلاك الوقود . ومن هذه النظائر السيزيوم ١٣٧ والاسترونشيوم ٩٠ والمولبدنيوم ٩٩ وغيرها .

كذلك يتم إنتاج ما يزيد على ١٢٠٠ نظير مشع صنعياً باستخدام المعجلات النووية حيث تسرع الجسيمات المشحونة بواسطة المعجل لطاقة معينة ثم يقذف هدف من نظير مستقر معين للحصول على النظير المشع