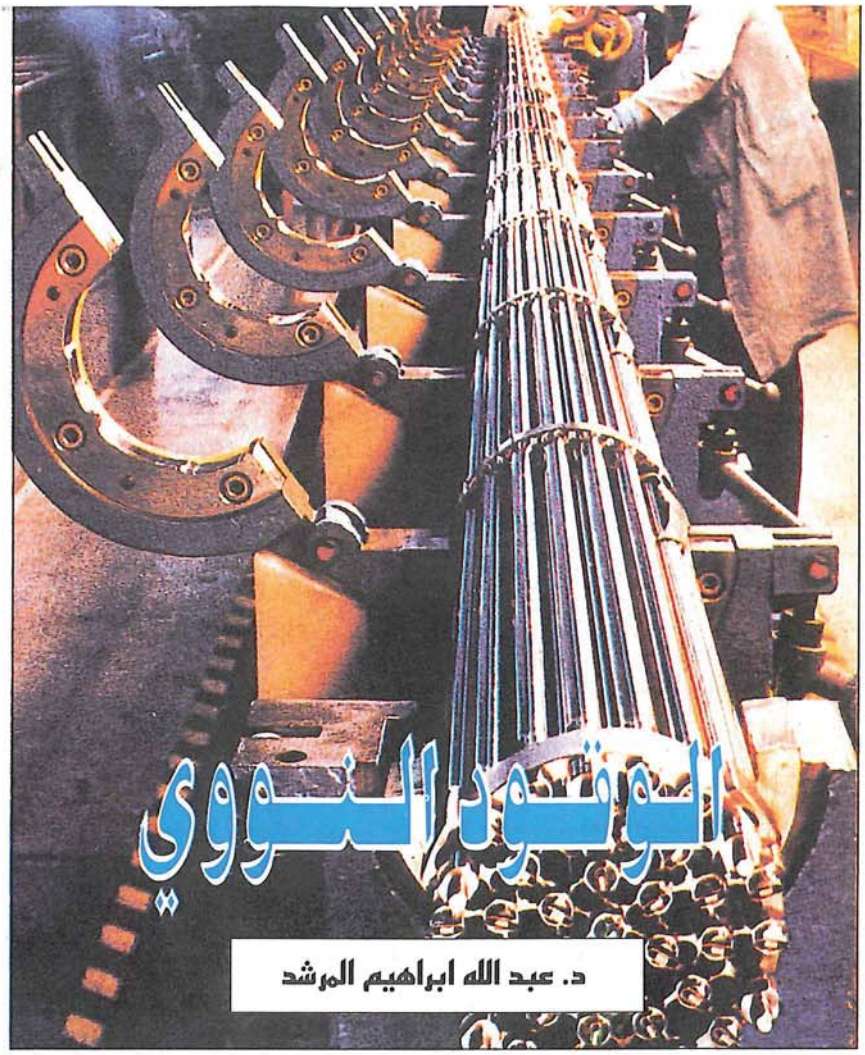


الوقود النووي

د. عبد الله ابراهيم المرشد

مع اكتشاف عملية الإنشطار النووي لذرة اليورانيوم سنة ١٩٣٨م تمكن العلماء من تطوير هذا الإكتشاف وتوظيفه في العديد من الإستخدامات العسكرية والسلمية. ويمكن التحكم في الطاقة النووية الناتجة عن هذا الإنشطار والإستفادة منها في إنتاج الطاقة الكهربائية كما هو مطبق في مفاعلات القوى النووية .

وهناك عدد من المواد التي تعرف بالمواد الإنشطارية وهي التي تنشطر بالنيوترونات البطيئة والسريعة ، وبعضها من نظائر اليورانيوم مثل اليورانيوم ٢٣٥ واليورانيوم٢٣٣ والبعض الآخر من نظائر البلوتونيوم مثل البلوتونيوم ٢٣٩ والبلوتونيوم ٢٤١، وهناك ما يعرف بالمواد القابلة للإنشطار وهي التي تنشطر بالنيوترونات السريعة فقط وتحتاج إلى عملية الإستيلاد لتصبح بدورها نظائر انشطارية كاليورانيوم ٢٣٨ والثوريوم ٢٣٢ ، ويتم ذلك بتفاعلها مع النيوترونات عند شرائح معينة من الطاقة ، وجميع هذه النظائر الإنشطارية لاتوجد في الطبيعة ما عدا نظير اليورانيوم ٢٣٥ والذي يوجد بنسبة قليلة في اليورانيوم الطبعي .

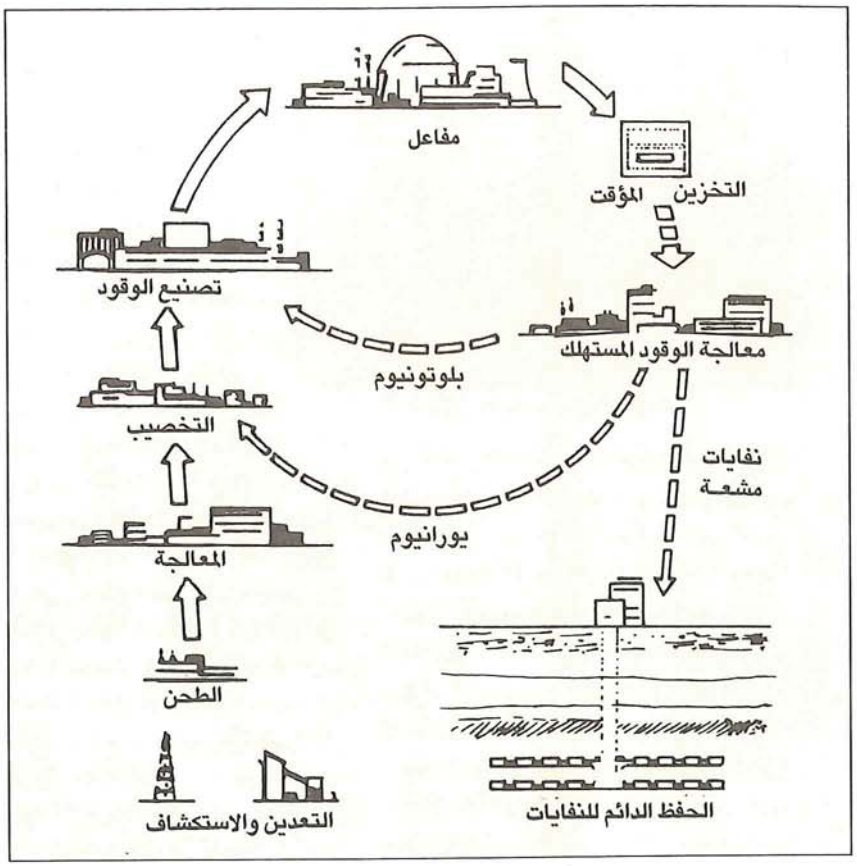
دورة الوقود النووي

تتألف دورة الوقود النووي من عدد من المراحل ، شكل (١) ، حيث تبدأ بالكشف عن خامات اليورانيوم في الطبيعة ثم الإستخلاص وتصنيع الوقود بعد تخصيبه. يلي ذلك عملية التشكيل ليتم وضع الوقود بالشكل النهائي الذي يتوافق مع تصميم قلب المفاعل، وبعد أن يستهلك هذا الوقود في المفاعلات يتم نقله إلى محطات إعادة معالجة الوقود ليعاد تصنيعه ومن ثم استخدامه، وأما ما تبقى من وقود مستهلك فإنه يحفظ في مقابر للنفايات المشعة صممت لهذا الغرض لحين التخلص من هذه النفايات نهائيا .

إنتاج اليورانيوم

توجد خامات اليورانيوم في الطبيعة في الحجر الرملي وحصى الكوارتز وفي عروق تمتد داخل التشكيلات الحجرية بنسب مختلفة تصل إلى ٤٪ إلا أن هذه النسبة قلت الآن بسبب نفاد الخامات ذات النسب العالية في المناجم المعروفة حتى صارت هذه النسبة ٠,٤٪ وقد تصل نسبة اليورانيوم في الخام المستخرج إلى أقل من هذه النسبة تمشيا مع قاعدة العرض والطلب والجدوى الإقتصادية لاستخراج اليورانيوم من الخامات ذات النسب الضئيلة . ويبين الشكل (٢) تطور إنتاج اليورانيوم في عدد من الدول حتى سنة ١٩٨٩م ، ويتوقع أن يصل حجم الطلب لتغذية المحطات النووية بحلول عام ٢٠٠٥ م إلى ٥٣٠٠٠ طن من اليورانيوم الطبعي في السنة . وقد بلغت تكلفة الكيلوجرام الواحد من اليورانيوم ٨٠ دولارا حتى مطلع ١٩٨٧م، على أن هذه التكلفة قد تصل إلى ١٣٠ دولارا لبعض الخامات، ومع ذلك فهي ما تزال اقتصادية مقارنة بأسعار بدائل الطاقة الأخرى .

تتم عمليات الكشف عن خامات اليورانيوم بطرق مختلفة منها الفيزيائية والكيميائية . وتبدأ هذه العمليات بالمسح العام للمناطق التي يتوقع وجود الخام فيها سواء على سطح الأرض أو في أعماق مختلفة البعد داخل القشرة الأرضية، وقد يستعان بتقنيات متقدمة كصور الأقمار الإصطناعية والإستشعار عن بعد . وعند التأكد من وجود الخامات تبدأ الأعمال المخبرية وعمليات الفصل لاستخلاص اليورانيوم من خاماته وتقدير تراكيزه وكمياته. وبعد الدراسات الإقتصادية تبدأ عمليات الإنتاج الفعلي بطحن الخامات في سلسلة من المطاحن لتكون على شكل حبيبات دقيقة لتجري عليها عمليات الإذابة لاستخلاص اليورانيوم على شكل أكاسيد لها الصيغة الكيميائية (U_3O_8) وهو ما يسمى بالكعكة الصفراء (Yellow Cake)



● شكل (١) مراحل دورة الوقود النووي.

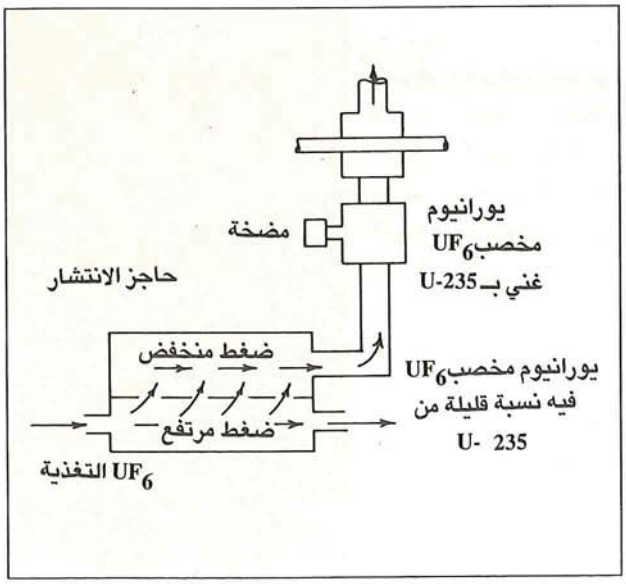
موجز يوضح فكرة كل طريقة وآلية عملها وبعض المزايا أو العيوب مقارنة بالطرق الأخرى وذلك فيما يلي :-

١ ـ طريقة الإنتشار الغازي

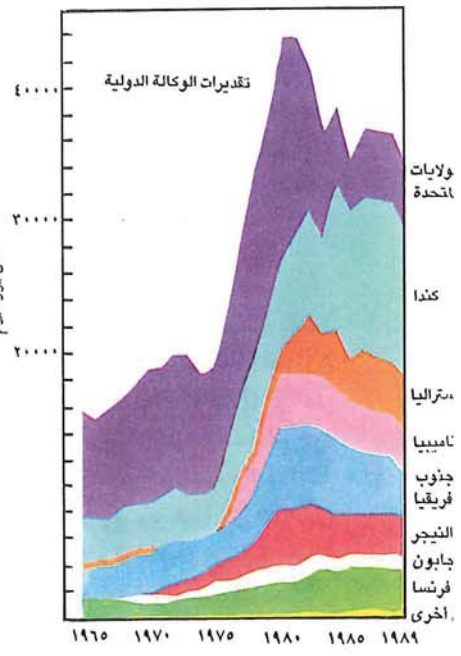
تعد هذه الطريقة من أقدم الطرق المستخدمة في تخصيب اليورانيوم، وتعتمد على الحركة التفضيلية للجزيئات الأقل كتلة عند مرورها خلال حاجز مسامي يقع بين وسطين يختلف الضغط بينهما وتتم عملية الفصل في جهاز يزود باليورانيوم في شكل غازي هو سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6) ، شكل (٣) . ويحدث الفصل بتوظيف فارق الضغط لينتشر الغاز من خلال المسامات الموجودة على سطح أنبوب التزويد، فالغاز المتكون من جزيئات مختلفة تتوزع طاقته بالتساوي بين جزيئاته، وعند تساوي الطاقات يكون للنظير الأخف سرعة أكبر. وكما هو معلوم من العلاقة بين الطاقة والسرعة والكتلة ($E = mv^2/2$) ، حيث E تمثل الطاقة و m تمثل الكتلة و v تمثل السرعة ، فإن الجزيئات الخفيفة تتمكن من النفاذ خلال الحاجز المسامي بدرجة أسرع من الجزيئات الثقيلة ، أي أن معدل انتشار سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ سوف يكون أسرع من سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٨ ، ويتم بذلك فصل نظيري اليورانيوم وتتحقق زيادة تركيز اليورانيوم ٢٣٥ . ويتطلب الوصول إلى نسبة تخصيب تصل إلى ٣٪ ـ وهي النسبة المستخدمة في التي قد تصل نسبة اليورانيوم الطبعي فيها إلى ٠,٨٥٪ .

تخصيب اليورانيوم

يكون تركيز اليورانيوم ٢٣٥ في الكعكة الصفراء هو التركيز الطبعي، وحيث أنه هو النظير الإنشطاري يجب زيادة هذه النسبة باستخدام عمليات التخصيب لترتفع من ٠,٧٪ إلى حوالي ٣٪ وهي النسبة المستخدمة في وقود مفاعلات الماء الخفيف، وأما في الإستخدامات العسكرية فيتم تخصيب اليورانيوم إلى درجات أعلى بكثير من هذا الرقم الأخير . وسوف نتعرض لبعض هذه التقنيات بشرح



● شكل (٣) التخصيب بالإنتشار الغازي.

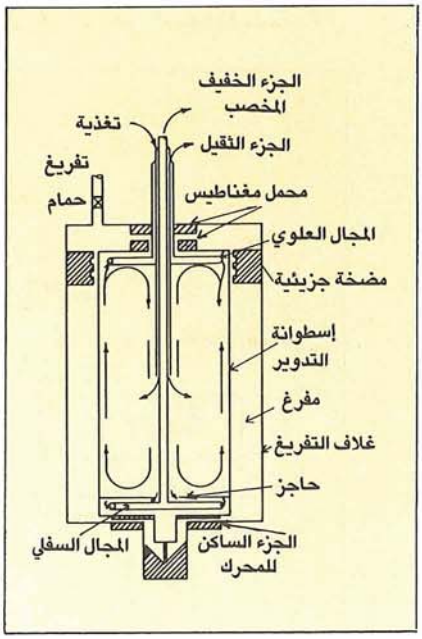


● شكل (٢) تطور انتاج اليورانيوم في العالم.

مفاعلات الماء الخفيف ـ توفر عدد من وحدات الفصل المرحلية تصل إلى المئات وقد تصل إلى الألف في حالة التخصيب لنسب مرتفعة بالإضافة إلى أن سادس فلوريد اليورانيوم يتفاعل مع الرطوبة ليكوِّن ثاني فلوريد اليورانيل (UO_2F_2) ، وهو مركب يسبب تآكل شديد للمعادن والمواد العضوية مما يشكل عقبة تؤدي إلى تآكل الحاجز المسامي الذي يجب المحافظة على شكله الأصلي لتبقى كفاءة الفصل مرتفعة .

٢ ـ طريقة الطرد المركزي

تتلخص فكرة هذه الطريقة في أن فرق القوة المسلط على جزيئين من غاز سادس فلوريد اليورانيوم بنظيرية ٢٣٥ و ٢٣٨ تختلف باختلاف كتلة كل من الجزيئين ، إذ أن القوة الطاردة تكون أكبر على الجزيئات ذات الكتلة الأكبر . وعند دوران الغاز في اسطوانة بسرعة عالية جدا فإن النظير ذا الكتلة الكبيرة (اليورانيوم ٢٣٨) يتركز حول جدار الأسطوانة بعيدا عن المحور بينما يتركز النظير الأخف كتلة (اليورانيوم ٢٣٥) حول محور دوران الأسطوانة ، وبهذا يتم الفصل وتتحقق عملية التخصيب كما هو موضح بالشكل (٤)، ومن مميزات هذه الطريقة أنها أكثر كفاءة في تخصيب اليورانيوم إذا ما قورنت بطريقة الإنتشار الغازي ، إلا أن تكاليفها مرتفعة بسبب تعقيدات أجهزتها .

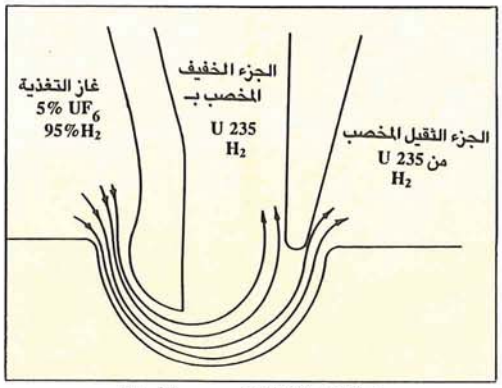


● شكل (٤) التخصيب بالطرد المركزي .

٣ ـ طريقة الفوهة

تعتمد هذه الطريقة على مبدأ الحركية الهوائية (Aerodynamic)، وهي من أكثر الطرق القائمة على هذا المبدأ تطورا ، وقد تم تطويرها في المانيا الغربية، ويبين الشكل (٥) آلية عمل هذه الطريقة حيث تتم تغذية جهاز الفصل المستخدم بخليط من سادس فلوريد اليورانيوم الغازي بنسبة ٥٪ مع غازات خفيفة أخرى كالهيدروجين أو الهيليوم بنسبة ٩٥٪ وذلك لتحسين كفاءة عمليات الفصل .

ويوفر استخدام غاز الهيليوم بديلا عن الهيدروجين أمانا أكبر ولكنه يزيد في استهلاك الطاقة بنسبة ٢٥٪ ، فعند مرور التغذية على انبعاج اسطواني تعترضها شفرة حادة ، وطبقا لمبدأ الحركية الهوائية سوف تميل الجزيئات الأثقل للتحرك قرب جدار الأسطوانة في حين تميل الجزيئات الأخف للتحرك قرب محور الأسطوانة، وهكذا تكون نسبة تركيز سادس فلوريد اليورانيوم٢٣٨ قرب جدار الأسطوانة أعلى من نسبة تركيزه بالقرب من المحور، في حين ينعكس الأمر بالنسبة لسادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ الأخف . وهكذا تقوم الشفرة الحادة بفصل الغاز إلى جزئين هما الجزء القريب من الجدار الأسطواني وفيه تقل نسبة سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥، والبعيد من الجدار وفيه تزيد نسبة سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ .



● شكل (٥) التخصيب بالفوهة .

٤ ـ طريقة الدوامة

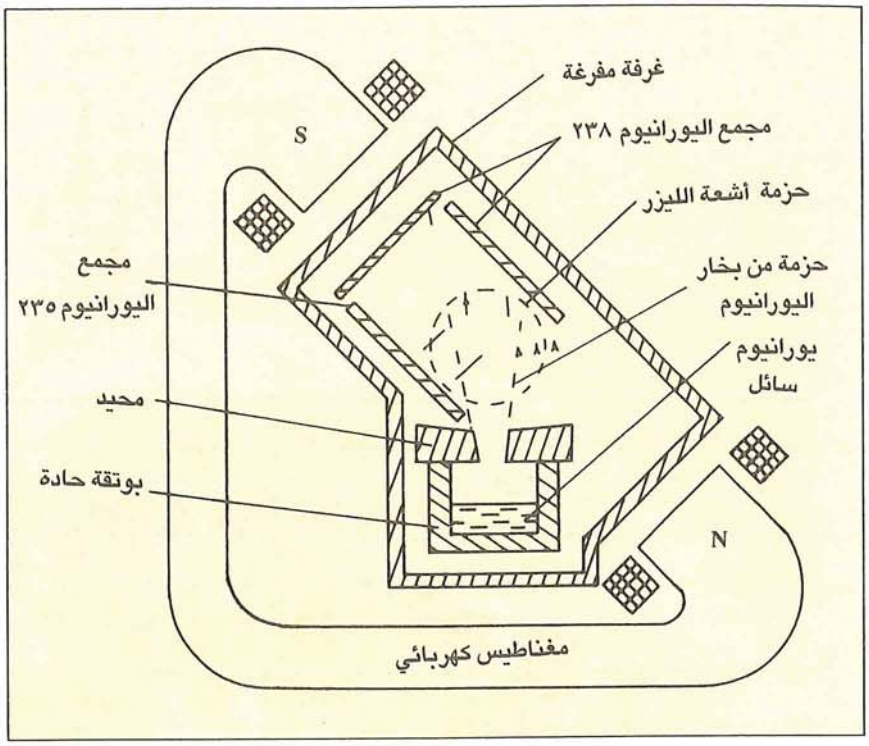
وهي طريقة ثانية تعتمد على مبدأ الحركية الهوائية وتتشابه فكرتها مع الطريقة السابقة، وطبقا لهذه الطريقة يتم الفصل بطريقة مشابهة للطريقة السابقة وذلك بتمرير خليط من غاز سادس فلوريد اليورانيوم والهيدروجين في دوامة غازية، وقد تم تطوير طريقة مشابهة لهذه الطريقة أيضا تسمى الهليكون (Helikon Process) في جنوب افريقيا . وهناك طريقة أخرى تعمل على نفس المبدأ تسمى طريقة فين شوك (Fenn Shock) لم ينشر عنها إلا القليل ولم يتم التأكد من جدوى استخدامها .

٥ ـ طريقة الليزر

تعد طريقة الليزر لتخصيب اليورانيوم من أفضل الطرق وأحدثها، وهي طريقة تستخدم بخار اليورانيوم الطبعي أو أحد مركباته ، وتعتمد على فرق الطيف الذري لليورانيوم٢٣٥ عن اليورانيوم ٢٣٨ ، وهذا الفرق ينتج بسبب فرق الكتلة بين نواتي النظيرين مما يسبب اختلافا بسيطا في مدارات الالكترونات بينهما . ويمكن التحكم في طول موجة الليزر بحيث تكون الموجة قادرة على تأيين (أي فصل الكترون) جزيئات اليورانيوم ٢٣٥ دون تأيين جزيئات اليورانيوم ٢٣٨ . وعند تأيين جزيئات اليورانيوم ٢٣٥ يؤثر المجال المغناطيسي على هذه الجزيئات عند تحركها عموديا عليه فتنحرف جزيئات اليورانيوم ٢٣٥ دون أن تنحرف جزيئات اليورانيوم الثقيل وبذلك يتم الفصل بفعالية كبيرة ، شكل (٦). ومن مميزات هذه الطريقة ارتفاع درجة التخصيب والتي قد تصل إلى ٥٠٪ من مرحلة واحدة وكذلك انخفاض تكاليف التخصيب بالمقارنة مع الطرق الأخرى إلا أنها تقنية عالية ليس من السهل الحصول عليها .

٦ ـ الطرق الكيميائية

هناك عدد من الطرق الكيميائية يعتمد بعضها على فصل النظائر بوساطة التوازن الطوري (Phase Equilibrium) أو على الإختلافات البسيطة في درجة التطاير بين أطوار المادة المختلفة الصلبة والسائلة والغازية ، فعند وجود كمية من سادس فلوريد اليورانيوم فإنه يحوي نسبة كبيرة من اليورانيوم ٢٣٨ ونسبة قليلة من اليورانيوم ٢٣٥ ، وحيث أن درجة تطاير سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ أكبر من درجة تطاير سادس فلوريد اليورانيوم



● شكل (٦) التخصيب بالليزر .

٢٣٨ يمكن استخدام هذه الظاهرة في عمليات التخصيب .

لعقد مقارنة من الناحية الفنية بين طرق التخصيب المختلفة يمكن النظر في الجدول (١) وملاحظة بعض الفوارق بين التقنيات المختلفة ، وحيث يتبين أن تقنية الليزر هي الأفضل فإن طريقة الإنتشار الغازي في المقابل تعد الأسوأ من ناحية درجة التخصيب والطاقة المستهلكة، وهذا تعبير واضح عن التقدم العلمي الذي حدث في مجال التخصيب ، حيث أن طريقة الإنتشار الغازي من أقدم الطرق المستخدمة بينما طريقة الليزر تعد الأحدث .

تصنيع الوقود

تعتمد خطوات تصنيع الوقود على نوع الوقود المطلوب وعلى نوع المفاعلات التي سيتم استخدامه فيها، فبعد أن يوضع التصميم النهائي للوقود المراد استخدامه تبدأ عمليات التصنيع. ففي مفاعلات الماء الخفيف (Light water reactor) يتم تحويل سادس فلوريد اليورانيوم المخصب بنسبة ٣٪ إلى ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) على شكل مسحوق يتم كبسه لتكوين كبسولات صغيرة الحجم يبلغ قطر الواحدة منها ٠,٨٢ سم وطولها ١,٢٤ سم تقريبا . وبعد إجراء عدد من العمليات الصناعية عليها لوضعها في الشكل النهائي وعدد من الإختبارات للتأكد من جودتها النوعية يتم رصها في أنابيب تسمى الأغلفة (Cladding) مصنوعة من سبائك الزركونيوم (Zircaloy) حيث تصبح على شكل قضبان من الوقود توضع في مجموعات لتكون منظومات الوقود (Fuel Assembly) التي تصبح جاهزة للإستخدام في المفاعلات .

إن من أهم الخصائص التي يجب أن يحققها الوقود المستخدم في المفاعلات هي قابليته لتحمل درجات الحرارة العالية داخل المفاعلات وكذلك الإستقرار في خواصه الآلية والكيميائية وأن لا يكون هدفا سهلا للتفاعلات الكيميائية وعلى الأخص التفاعلات التي تؤدي إلى عمليات التآكل وكذلك تحمله لظروف التشعيع الشديدة بالإشعاعات المختلفة وثبات مدة وجوده داخل المفاعل لضمان عدم وصوله للمبردات المستخدمة وتلويثها بالمواد المشعة ، وتتطلب هذه الخصائص وضع مواصفات عالية للوقود المطلوب وإجراء عدد من الإختبارات الدقيقة للتأكد من جودته النوعية .

النفايات المشعة

يصبح الوقود المستهلك بعد أن يتم إخراجه من قلب المفاعل وقودا مشعا تتراكم داخل غلافه كميات كبيرة من نواتج الإنشطار المشعة، ويصدر فيضا هائلا من جسيمات بيتا وإشعاعات جاما بالإضافة للحرارة العالية. وللتقليل من أخطار الإشعاع وخفض درجة حرارة الوقود ، يتم وضع منظومات الوقود في أحواض من الماء صممت لهذا الغرض لمدة زمنية تصل لسنتين حيث تبدأ الإشعاعات بالإضمحلال والحرارة بالإنخفاض ، بعد ذلك ينقل إلى وحدات معالجة الوقود المستهلك .

تسعى الدول المتقدمة والمستخدمة للطاقة النووية جاهدة في البحث عن تقنيات تستطيع بها معالجة النفايات المشعة الناتجة من محطات الطاقة النووية، إلا أن المشكلة أكبر من أن تخضع لحل سريع وعاجل بعد أن تراكمت لسنوات عديدة النواتج المشعة للمفاعلات، وستظل القضية الكبرى للصناعة النووية هي التخلص من النفايات المشعة ما لم توجد طريقة عملية وآمنة تكفي الإنسان وبيئته شر أخطارها .

وجه المقارنة	الانتشار الغازي	الطرد المركزي	الديناميكا الهوائية	تقنية الليزر
درجة التخصيب	منخفض	مرتفع	متوسط	عالي
الضغط المستخدم	متوسط	منخفض	متوسط	منخفض جداً
المخزون المطلوب	عالي	منخفض	منخفض	منخفض
الطاقة المستهلكة	كبيرة جداً	قليل	كبيرة	قليل جداً

● جدول (١) مقارنة طرق التخصيب المختلفة .