

المستخدمة في هذه العملية تتراوح بين ٣٠٠٠ - ٣٥٠٠ كيلو واط.ساعة /كغم (٣,٠٠٠ - ٣٥٠٠ KWh/Kg SWU) وهي أعلى من الطاقة المستخدمة في طريقة الانتشار الغازي.

فصل النظائر بالليزر *Laser Isotope Separation*

تختلف نظائر اليورانيوم اختلافاً بسيطاً في مواقع مستوياتها الإلكترونية والمستويات الاهتزازية لجزيئاتها. فاختلاف الطاقة بين مستويين في ذرتي اليورانيوم هو في حدود ٢,١ إلكترون فولت (الضوء الأحمر - البرتقالي) في حين تختلف القيم الحقيقية لليورانيوم ٢٣٥ (^{235}U) واليورانيوم ٢٣٨ (^{238}U) بمقدار $٤,٢ \times ١٠^{-٥}$ إلكترون فولت. وجود الليزر الذي يمكن إنتاجه بأطوال موجية معينة بدقة متناهية بحيث تكون لها المقدرة على إثارة ذرات اليورانيوم ٢٣٥ دون التأثير على ذرات اليورانيوم ٢٣٨ أوجد الرغبة في تطوير طريقة لفصل النظائر تعتمد على الليزر.

وتقنية فصل النظائر بالليزر المعتمدة على البخار الذري (Atomic Vapour Laser Isotope Separation AVLIS) قد بحثت في عدة دول وكانت جديدة بأن تبرز كتقنية جديدة في مجال فصل النظائر. وفي هذه العملية فإنه لفصل النظير يتم عمل تأيين انتقائي لذرات اليورانيوم ٢٣٥ دون اليورانيوم ٢٣٨. ثم يتم تجميعها باستخدام مجالين كهربائي ومغناطيسي. و يتطلب تأيين ذرات اليورانيوم ٢٣٥ ما يقارب ٦,٢ إلكترون فولت من الطاقة. وهذه الطاقة يمكن الحصول عليها بواسطة ثلاثة فوتونات ليزر ذات اللون الأحمر-البرتقالي. ويتم توليد بخار ذرات اليورانيوم بقذف فلز اليورانيوم بواسطة شعاع من الإلكترونات، وتتأين ذرات اليورانيوم ٢٣٥ الموجودة في البخار بواسطة طاقة ملائمة من فوتونات الليزر. بعد ذلك يتم تحويل أيونات اليورانيوم ٢٣٥ إلى قطب التجميع للحصول على اليورانيوم ٢٣٥. في حين تبقى ذرات اليورانيوم ٢٣٨ غير المتأين كي تجمع في اتجاه آخر. ومعاملات

الفصل المرحلية المثالية يمكن أن تصل إلى ١٥ ، إلا أن القيم من ٥ إلى ١٠ تعتبر قيماً واقعية عملياً. وتتطلب عملية إثراء اليورانيوم ٢٣٥ حتى نسبة ٣٪ مرحلة واحدة فقط والطاقة المستهلكة تقدر بحوالي ١٠٠ كيلو واط. ساعة / كغم (100 kWh/kg SWU).

وفي طريقة الفصل الجزيئي للنظائر بالليزر (Molecular Laser Isotope Separation (MLIS)) ، يتم إثارة جزيئات سادس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ ($^{235}\text{UF}_6$) انتقائياً بواسطة ليزر الأشعة تحت الحمراء (Infra-red laser) ، ثم يتم تعريضها لأشعة ليزر فوق بنفسجية (Ultra-violet laser) وذلك لتفكيك $^{235}\text{UF}_6$ إلى فلور وخامس فلوريد اليورانيوم ٢٣٥ ($^{235}\text{UF}_5$ و F) الذي هو مادة صلبة تتكثف من الغاز في حين أن جزيئات $^{238}\text{UF}_6$ لا تتأثر. ولكون طيف الـ UF_6 معقداً فإن هذا يجعل الإثارة الانتقائية لجزيئات سادس فلوريد اليورانيوم UF_6 أمراً بالغ الصعوبة. وهناك عدد من الطرق المبتكرة لهذا الغرض، مثل التبريد بالنفث (Jet cooling) لبخار سادس فلوريد اليورانيوم UF_6 التي مازالت تحت الدراسة والتطوير. ولا توجد في الوقت الحاضر معلومات عن معامل الفصل الذي تم تحقيقه بهذه الطريقة.

اليورانيوم كوقود Uranium as Fuel

خصائص الوقود النووي Characteristics of Nuclear Fuel

القدرة النوعية Specific Power

تصمم قضبان فلز اليورانيوم أو حبيبات ثاني أكسيد اليورانيوم بحيث يكون لها قطر معين، اعتماداً على التوصيلية الحرارية للمادة وعلى أعلى درجة حرارة يسمح بها في لب المفاعل، وعلى قدرة نظام التبريد على خفض الحرارة داخل المفاعل. وفي حالة استخدام فلز اليورانيوم فإنه يفضل استخدام قضبان فلزية منه بقطر ٣٠ مم تقريباً، بسبب أن درجة حرارة مركز المفاعل يجب أن تبقى أقل

من ٦٠٠ درجة مئوية، لتتألف أي تحول في الطور لليورانيوم ، بحيث تبقى قدرة المفاعل محدودة بـ ٥ ميغاوات حراري/طن . ويتطلب المفاعل الذي ينتج ١٠٠٠ ميغاواط حرارة (حوالي ٣٠٠ ميغاواط كهرباء) حوالي ٢٠٠ طن من فلز اليورانيوم. وفي حالة استخدام أكسيد اليورانيوم كوقود للمفاعلات الحرارية، فإن هذا الوقود يكون عبارة عن أقراص من ثاني أكسيد اليورانيوم بقطر تقريبي ١٢ مم . وعلى الرغم من أن التوصيلية الحرارية للأكسيد أقل منها للفلز، فإن استخدام أقراص ذات قطر أقل، وبسبب درجة الانصهار العالية، يمكن الحصول على قدرة نوعية تصل إلى ٢٠ ميغاواط حراري/طن. فالمفاعل ذو القدرة ٣٠٠ ميغاواط كهرباء يتطلب عندئذ حوالي ٥٠ طناً من اليورانيوم الطبيعي. وعندما يثري ثاني أكسيد اليورانيوم فإنه من الممكن الحصول على قدرة نوعية تبلغ ٢٥-٣٥ ميغاواط حراري/طن ، وبذلك تقل كمية اليورانيوم المطلوبة أيضاً. وفي المفاعلات الولودة السريعة، فإن الوقود يحوي ٢٠ ٪ من المواد الانشطارية. وبتصنيع أعمدة الوقود بقطر ٥ مم واستخدام الصوديوم كمبرد، فإن القدرة النوعية يمكن أن ترتفع إلى ٢٠٠ ميغاواط حراري/طن . ولهذا فإن مفاعل ولود سريع بقدرة ٣٠٠ ميغاواط كهرباء يتطلب ٥ طن من الوقود فقط. وعليه فإن المفاعلات الولودة السريعة هي مصادر طاقة صغيرة الحجم.

الاحتراق *Burn up*

من الخصائص الأخرى الهامة للوقود النووي الاحتراق. وهو مقياس للطاقة الكلية المنتجة من الوقود أثناء بقائه داخل المفاعل. ويقاس الاحتراق بوحدة الميجاوات. يوم لكل طن (MWd/te). فانشطار ١ جرام من اليورانيوم ينتج ١ ميغاواط. يوم من الطاقة الحرارية التي تكافئ الحرارة الناتجة من ألف سخان قدرة كل منها ١ كيلوواط يعمل كل منها ليوم واحد. وهذا يكافئ تقريباً الحرارة الناتجة من احتراق ٢,٥ طن من الفحم. وإذا حدث انشطار لطن واحد من

اليورانيوم وكانت نسبة اليورانيوم ٢٣٥ فيه هي ٠,١٪ (أي ١ كجم ^{235}U)، فإن ناتج الاحتراق سيكون ١٠٠٠ ميغا واط. يوم/طن. فالاحتراق الذي يمكن الحصول عليه من الوقود يعتمد بشكل كبير على تركيز النظائر الانشطارية في الوقود نفسه. واستهلاك كل اليورانيوم ٢٣٥ الموجود في اليورانيوم الطبيعي يكافئ ٧٠٠٠ ميغا واط. يوم/طن. ومن الممكن الحصول على هذا الاحتراق حتى لو بقي جزء كبير من اليورانيوم ٢٣٥ دون أن ينشط، وذلك لأن الطاقة تنتج أيضاً بواسطة انشطار البلوتونيوم المتولد من اليورانيوم ٢٣٨. وعملياً فإن الوقود لا يترك في المفاعل حتى تستهلك جميع المواد الانشطارية فيه وذلك لأنه يجب أن يكون هناك حد أدنى لمحتوى هذه المواد في الوقود للمحافظة على معدل القدرة في المفاعل. كذلك فإن احتراق الوقود يمكن أن يقيد بتراكم نواتج الانشطار داخل قضبان الوقود. وهذا في حالة الوقود الفلزي حيث أن أعلى احتراق يمكن الوصول إليه هو ٥٠٠٠ ميغا واط. يوم/طن على الرغم من التغليف المحكم. وفلز اليورانيوم ينتفخ أثناء توليد الطاقة بسبب عدم وجود فراغ لنواتج الانشطار في مادة الفلز. أما أكسيد اليورانيوم فهو أكثر تحملاً لنواتج الانشطار، وعند وجود مقدار كاف من الإثراء، فإنه يمكن الوصول إلى درجة عالية من الاحتراق. وفي هذه الحالة فإن التآكل الكيميائي لمادة التغليف بسبب نواتج الانشطار، إضافة إلى إنتفاخ الوقود يحدد مقدار الاحتراق.

ويمكن الوصول إلى درجة احتراق تقترب من ٣٣ ألف ميغا واط. يوم/طن في مفاعلات الماء المضغوط. ولهذا فإن الاحتياج السنوي من الوقود لمفاعل الماء المضغوط بقدرة ١٠٠٠ ميغا واط حرارة (٣٠٠ ميغا واط كهرباء) هو فقط ١٠ طن. وهناك محاولات جارية لزيادة هذا الاحتراق إلى ٥٠ ألف ميغا واط حرارة/طن الذي سيؤدي إلى تحسين اقتصاديات الوقود.

وفي حالة المفاعلات الولودة السريعة فإن الضرر الذي تلحقه النيوترونات بمادة التغليف يدخل في الحسبان. وعلى كل فإن درجة الاحتراق التي تم

الحصول عليها هي ١٠٠٠٠٠ ميغا واط. يوم / طن. وفي بعض الحالات وصلت درجة الاحتراق إلى ٢٠٠٠٠٠ ميغا واط. يوم / طن. وعلى ذلك، فإن الاحتياج السنوي من الوقود للمفاعلات الولودة السريعة يعتبر قليلاً جداً. ويورد جدول (٢-٣) بعض بيانات الوقود العامة.

تصنيع الوقود *Fuel Manufacture*

ان تصنيع وقود فلز اليورانيوم هو من التقنيات الصعبة لوجود بعض الخصائص غير المرغوب فيها لفلز اليورانيوم. وقضبان فلز اليورانيوم عندما تسخن وتبرد لعدة مرات مثلما يحصل عادة في المفاعلات، يحدث لها استطالة. ولأن هذا السلوك لا يمكن قبوله في المفاعلات فإن الوقود يعامل معاملة حرارية خاصة أثناء تصنيعه لتلافي هذه المشكلة. كذلك فإن فلز اليورانيوم يحدث له انتفاخ أثناء التشعيع ولهذا لا بد أن تكون مادة التغليف قوية أو أن يكون الاحتراق منخفضاً.

وعلى سبيل المثال، فإن تصنيع وقود المفاعل الهندي سيروس (CIRUS) يتم بصهر حوالي ٩٥ كجم من اليورانيوم في فرن مفرغ من الهواء ثم تسبك على شكل قضبان بقطر ٧٥ مم وطول ٩٠٠ مم. هذه القضبان تدرفل حرارياً لتقليل القطر إلى ٤٠ مم، وتعامل حرارياً ثم تشغل آلياً لجعل القطر ٣٤,٥ مم وبطول ٣,١ م، ووزن ٥٥ كجم. ويستخدم أنبوب ألومنيوم ذو نتوءات لتغليف قضبان الوقود. ويوضع أنبوب ألومنيوم آخر يغطي نتوءات أنبوب التغليف بحيث يبقى فراغ بينهما يسمح لمروء ماء التبريد. ويستخدم ١٩٢ قضيباً من هذه القضبان عند تشغيل المفاعل.

وقود الأكسيد *Oxide fuel*

أكسيد اليورانيوم عبارة عن مسحوق طفلي، ومن غير الممكن تصنيعه

الخصائص	مفاعل الماء الثقيل المضغوط (PHWR)	مفاعل الماء المضغوط والماء المغلي (BWR/PWR)	مفاعل التبريد الغازي (GCR)	المفاعلات الولودة السريعة (FBR)
الوقود	UO ₂	UO ₂ *	U	UO ₂ - PuO ₂
القدرة النوعية ميغا واط حرارة/طن (MWt/te)	٢٠	٥ ± ٣٠	٥	٢٠٠
الوقود الكلي طن (te)	٥٠	٣٣	٢٠٠	٥
الاحتراق (ميغا واط.يوم/طن) (MWd/te)	٧,٠٠٠	٤١٠٠٠ - ٣١٠٠٠	٥,٠٠٠	أكبر من ١٠٠,٠٠٠
متطلبات الوقود السنية (طن) (te)	٥٠	١٠	٧٠	٣,٥

* وقود مثرى

جدول (٢-٣): خصائص الوقود النووي لمفاعل بقدرة ١٠٠٠ ميغا واط حراري
(٣٠٠ ميغا واط كهربائي)

كقضبان. ولهذا فإن أكسيد اليورانيوم يستخدم على شكل أقراص ذات قطر يساوي ١٢ مم وارتفاع ١٥ مم. ويتم إعداد هذه الأقراص بضغط ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) كي يشكل أقراصاً يتم بعد ذلك تسخينها إلى ٦٠٠ درجة مئوية للحصول على مادة صلبة عالية الكثافة. ومن المهم المحافظة على قطر هذه الأقراص لضمان دخولها في أنبوب التغليف. كما أنه يجب أن يكون الفراغ بين الأقراص وأنبوب التغليف صغيراً، بحيث تنتقل الحرارة بشكل تام من الأقراص إلى أنبوب التغليف. ويجب أن تكون كثافة جميع الأقراص متماثلة لتلافي وجود نقاط ساخنة. ولأن بعض نواتج الانشطار عبارة عن غازات فيجب أن يكون تركيب هذه الأقراص قابلاً للاحتفاظ بهذه الغازات حيث أن أي انطلاق لهذه الغازات يسبب ارتفاع الضغط على أنبوب التغليف، مما يؤدي إلى فشل هذا الوقود. وتوضع أقراص الوقود داخل أنابيب تغليف مصنوعة من سبيكة الزركونيوم ويتم لحامها. ويجمع عدد من هذه الأنابيب لتكوين حزمة وقود. وفي مفاعلات الماء الخفيف LWR ، فإن أعمدة الوقود تكون طويلة إلى حد ما بسبب الاحتراق العالي الذي يمكن الحصول عليه، لذلك فإنه يترك بعض الفراغ لنواتج الانشطار والغازات المنطلقة أثناء إنتاج الطاقة الكهربائية. والخواص النموذجية لحزم الوقود في محطات الطاقة في راجستان Rajasthan (RAPS) وتارابور Tarapur (TAPS) موضحة في جدول (٣-٢).

القدرات في تصنيع الوقود Capabilities in Fuel Manufacture

إن تصنيع الوقود النووي هو تقنية من التقنيات التي تستلزم براعة في التعامل مع المواد عالية النقاوة للوفاء بالموصفات الصارمة. وتعتمد الجوانب الاقتصادية وجوانب السلامة في المفاعلات النووية بشكل كبير على جودة

الوقود. وقد بذل في الهند جهد كبير لتطوير هذه التقنية. ومنذ بناء أول مفاعل، وهو مفاعل سيروس (CIRUS) للأبحاث، فإن نصف احتياجات هذا المفاعل محلياً. وفي الوقت الحاضر، فإن الاحتياجات من الوقود لمفاعلي الأبحاث سيروس (CIRUS) ودروفا (DHRUVA) يتم تلبيتها بواسطة مصنع الوقود في مركز بهابها للبحوث الذرية BARC في ترمبي Trombay. وقد تمت جميع المراحل الأساسية للتطوير والتصنيع لمفاعلات الطاقة التي تستخدم وقود الأكسيد في مركز بهابها BARC. أما العمليات الكبيرة على المستوى التجاري فقد بدأت في مجمع الوقود النووي NFC، في حيدر أباد وذلك في عام ١٩٧٣م. ويحصل هذا المجمع على اليورانيوم الطبيعي من جادوجودا على شكل كعكة المغنسيوم ثنائي اليورانيوم غير النقي (magnesium diuranate cake). ويتم الحصول على اليورانيوم المثري المطلوب لمفاعل تابس TAPS على شكل سادس فلوريد اليورانيوم من مصادر خارجية.

لقد بدأ مصنع اليورانيوم الوطني بقدرة ١٠٠ طن/سنة. ويقوم المصنع بكل الخطوات بدءاً من تنقية اليورانيوم، وإعداد بودة ثاني أكسيد اليورانيوم عالية الجودة، وتصنيع الأقراص وتغليفها في أنابيب التغليف وتصنيع حزم الوقود. وتصل القدرة الحالية للمصنع إلى ٣٠٠ طن/سنة، ويمكن أن يفي هذا المصنع باحتياجات مفاعلات الماء الثقيل المضغوط ذات القدرة ٢٠٠٠ ميغا واط كهرباء. ويتم تلبية جميع احتياجات مفاعلات كوتا (Kota) وكلبكام (Kalpakkam) ونارورا (Narora) وكاكرابر (Kakrapar) من وقود اليورانيوم من هذا المصنع. ولقد تم رفع قدرة المصنع إلى ٦٠٠ طن/سنة لتلبية الطلب المتزايد على الوقود. وبعد التوسعة يمكن أن يفي هذا المصنع باحتياجات مفاعل الماء الثقيل المضغوط ذي

البيان	مفاعل RAPS	مفاعل TAPS
نسبة الإثراء %	طبيعي	٢,٦٦، ٢,١، ١,١
قطر الأقراص × طولها (مم)	١٤,٢٦ × ٢٢	١٢,٢٤ × ٢٠
أنبوب الزركونيوم (القطر مم)	١٥,٢٢	١٤,٢٨
سمكة الجدار (مم)	٠,٣٨	٠,٨٩
فراغ غلاف الوقود (ميكرومتر)	٥٠	١٥٠ – ١٠٠
عدد الأقراص في الأنبوب	٢٤	٢٠٠
وزن الأنبوب والأقراص (جم)	٨٠٠ تقريباً	٤٥٠٠ – ٤٣٠٠
عدد الأنابيب في حزمة الوقود	١٩	٣٦
وزن الأقراص في حزمة الوقود (كجم)	١٥,٢ تقريباً	١٦٠ – ١٥٥
عدد الحزم في كل قناة	١٢	—
عدد القنوات في المفاعل	٣٠٦	—
العدد الكلي لحزم الوقود	٣٦٧٢	٢٨٤
وزن الوقود في المفاعل طن (te)	٥٦	٤٥
طول عنصر الوقود	٤٩٥	٣٨٨٥

جدول (٣-٣): خصائص وقود أكسيد اليورانيوم لمفاعلي RAPS , TAPS.

القدرة ٦٠٠٠ ميغا واط كهرباء. أما الوقود المثري إلى ١,١ ٪ و ٢,١ ٪ و ٢,٦٦ ٪ لمفاعلات الماء المغلي الموجودة في تارابور فإنها تصنع من سادس فلوريد اليورانيوم المستورد. وسعة محطة معالجة سادس فلوريد اليورانيوم تصل إلى ٢٤ طن / السنة. ويستخدم سداسي الفلوريد (Hexafluoride) لترسيب الأمونيوم ثنائي اليورانيوم (ammonium diuranate). وبقيّة العملية مشابهة لعملية إعداد وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط. وتحتوي بعض قضبان الوقود في هذا المفاعل على ١,٥ ٪ من أكسيد الجادولينيوم المخلوط مع أكسيد اليورانيوم، الذي يستخدم كأحد سموم الاحتراق وذلك لتحسين عملية احتراق الوقود. وتتكون حزم الوقود لمفاعل تابس TAPS من ٣٦ عموداً منظمة بشكل منظومة ٦ × ٦.

وسبكة الزركونيوم المستخدمة في إنتاج أنابيب التغليف وبعض عناصر الوقود تنتج أيضاً في مجمع الوقود النووي NFC في حيدرآباد، بدءاً باستخلاص الزركونيوم من رمال الساحل في كيرالا (Kerala) في أوريسا (Orissa)، وسيتم مناقشة ذلك بالتفصيل في الفصل السابع.

الفصل الرابع

البلوتونيوم PLUTONIUM

مقدمة تاريخية History

لقد أوجد اكتشاف الانشطار النووي عام ١٩٣٩ قوة دافعة لتوسيع الجدول الدوري للعناصر. وقد ظهر فرع جديد من فروع العلوم النووية قاد إلى اكتشاف عناصر مابعد اليورانيوم. وهذا المجال البحثي النامي المزدهر قاد إلى اكتشاف عناصر جديدة وصلت حتى العنصر رقم ١١٢ حالياً. وقد اكتشف البلوتونيوم بواسطة العالم سيبورغ (G. T. Seaborg) ومعاونيه. ويعتبر البلوتونيوم أول عناصر ما بعد اليورانيوم التي أمكن فصلها بكميات محسوسة. وقد فصل كل من كوننجهام (B. B. Cunningham) وورنر (L. B. Werner) كمية من البلوتونيوم ٢٣٩ تقدر بحوالي ١ ميكرو جرام، وذلك في ١٨ أغسطس عام ١٩٤٢ م. وقد تمت عملية الفصل هذه باستخدام خمسة كيلوجرامات من نترات اليورانيوم المائية $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ التي شععت بالنيوترونات المنتجة بواسطة تفاعل الديوتيريوم مع البريليوم باستخدام المسرع النووي الدوار (سيكلوترون) بجامعة كاليفورنيا (مختبر الإشعاع - بيركلي). وقد تمت إضافة ٥ مللي جرام من السيريوم (Ce) واللانثانيوم (La) المذابة في حمض الكبريتيك H_2SO_4 ذي تركيز ٥,٠ مولار إلى المحلول الذي تم تركيزه بواسطة التبخير ثم رسبت الفلوريدات بإضافة محلولي حمض الهيدروفلوريك (HF) وفلوريد البوتاسيوم (KF). ثم حولت الفلوريدات إلى كبريتات بإضافة حمض الكبريتيك H_2SO_4 . وفي هذه المرحلة فإن العناصر الأرضية النادرة مثل السيريوم واللانثانيوم ترسبت كفلوريدات وبقى البلوتونيوم في المحلول. وبإعادة هذه العملية بشكل دوري نتج بلوتونيوم نقي، يستخلص في محلول حمض النيتريك المخفف (HNO_3). وقد كانت المحصلة النهائية من البلوتونيوم كمية غير محسوسة وزناً. لذلك، أعيدت التجربة باستخدام ٩٠ جراماً

من نترات اليورانيوم وذلك في ١٠ سبتمبر عام ١٩٤٢ م. وقد تم الحصول على أول كمية نقية موزونة من هذا العنصر المنتج صناعياً عندما وضع محلول البلوتونيوم النقي في كفة من البلاتين معروفة الوزن والتي تم حرقها وكان فارق الوزن بعد الحرق هو ٢,٧٧ ميكرو جرام من أكسيد البلوتونيوم PuO_2 وقد حفظت هذه الكمية لتصبح مرجعاً مستقبلياً.

التحول والتوالد Conversion and Breeding

البلوتونيوم هو المفتاح لاستخدام جميع اليورانيوم المستخرج من المناجم لإنتاج الطاقة النووية. وهو المادة المصنعة الوحيدة التي تنتج حالياً بالأطنان. وأول إنتاج عالمي لعنصر البلوتونيوم، بما يقدر بحوالي ٣ ميكرو جرام كان في الولايات المتحدة الأمريكية في نوفمبر عام ١٩٤٢ م. وبعد إنشاء مفاعلات الطاقة وتحويل اليورانيوم ٢٣٨ الخصب إلى بلوتونيوم ٢٣٩، فإنه ينتج ما يقارب ١٠٠ طن من البلوتونيوم ٢٣٩ سنوياً في هذه المفاعلات المنتشرة في العالم. إن حجم اليورانيوم ٢٣٨ المحول إلى بلوتونيوم ٢٣٩ يختلف من مفاعل إلى آخر، حيث أنه يعتمد على عدد النيوترونات المنتجة لكل انشطار في المفاعل وعلى العمليات التي يتم فيها امتصاص النيوترونات. وفي الحالة المستقرة للمفاعل فإن عدد النيوترونات الموجودة في المفاعل تساوي عدد النيوترونات المستهلكة بواسطة التفاعلات النووية المختلفة. والجدول (٤-١) يعطي مثلاً نموذجياً لتوازن النيوترونات لكل ١٠٠ انشطار في مفاعل ماء خفيف.

النيوترونات المفقودة	نيوترونات ممتصة في اليورانيوم والبلوتونيوم دون انشطار	نيوترونات مسببة للانشطار
مواد البناء ٤٥ نواتج الانشطار ١٤	بلوتونيوم ٢٧ يورانيوم ٢٣٥ ١٥ يورانيوم ٢٣٨ ٥٨	بلوتونيوم ٣٢ يورانيوم ٢٣٥ ٦٣ يورانيوم ٢٣٨ ٥
↓ نواتج التنشيط	↓ إنتاج بلوتونيوم وأكتينيدات أعلى	↓ إنتاج طاقة و ٢٥٩ نيوترون

جدول (٤-١) التوازن النيوتروني في مفاعل ماء خفيف

(كل ١٠٠ انشطار ينتج ٢٥٩ نيوترون).

وفي هذا النوع من المفاعلات فإنه في المتوسط كل ١٠٠ انشطار ينتج ٢٥٩ نيوترونا. ومن هذه النيوترونات فإن ١٠٠ نيوترون تستهلك لتغذية تفاعل الانشطار التسلسلي، و ١٠٠ نيوترون أخرى تفقد بامتصاصها في البلوتونيوم واليورانيوم. وعندما تمتص هذه النيوترونات في نظائر خصبة مثل اليورانيوم ٢٣٨ أو البلوتونيوم ٢٤٠ فإنه ينتج عنها نظائر انشطارية هي البلوتونيوم ٢٣٩، و البلوتونيوم ٢٤١ بالترتيب. وعلى كل، فإن امتصاص النيوترونات بواسطة البلوتونيوم ٢٣٩ أو اليورانيوم ٢٣٥ أو البلوتونيوم ٢٤١ دون أن يحدث انشطارا نوويا يعتبر خسارة غير مرغوبة للنيوترونات. فضلا عن ذلك، هناك ما متوسطه ٥٩ نيوترونا تفقد بامتصاصها في بنية المفاعل ونواتج الانشطار. وغالبية الانشطار (٦٣٪) يحدث في اليورانيوم ٢٣٥؛ ولكن جزءاً هاماً (٣٢٪) يحدث أيضاً في نظائر البلوتونيوم، وجزء بسيط (٥٪) من الانشطارات تحدث في اليورانيوم ٢٣٨ نتيجة للنيوترونات السريعة التي لم تتم تبطئتها.

تعرف نسبة النظائر الانشطارية (Fissile) المنتجة في المفاعل إلى النظائر الانشطارية المستهلكة فيه بنسبة التحول (Conversion Ratio). وفي مفاعلات الماء الخفيف فإن نسبة التحول هي ٠,٥٥ ، وهذا يعني أنه لكل ١٠٠ ذرة يورانيوم ٢٣٥ تستهلك هناك ٥٥ ذرة بلوتونيوم انشطارية تتولد . وفي مفاعلات الماء الثقيل المضغوط فإن عملية اقتصاد النيوترونات أفضل ونسبة التحول الممكنة هي ٠,٧ . إن الناتج السنوي من البلوتونيوم من مختلف المفاعلات يعتمد على نسبة التحول وعلى مدى احتراق الوقود. والناتج السنوي للبلوتونيوم من أنماط مختلفة من المفاعلات ذات القدرة ١٠٠٠ ميغا واط كهرباء هو كالتالي:

١- مفاعلات الماء الخفيف تنتج ٢٢٠ كجم.

٢- مفاعلات الماء الثقيل المضغوط تنتج ٥٠٠ كجم.

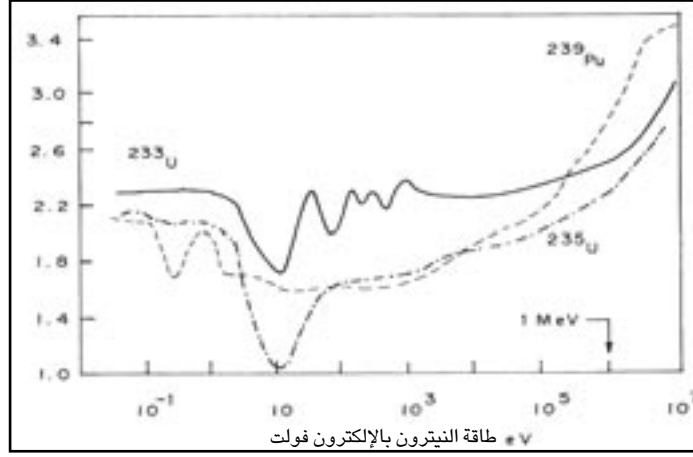
٣- المفاعلات المبردة بالغاز تنتج ٧٠٠ كجم.

ومن الملاحظ أن إنتاج البلوتونيوم في أي مفاعل يعتمد على توازن النيوترونات (المنتجة والمستهلكة). فإذا أمكن زيادة إنتاج النيوترونات من الانشطار النووي، أو أمكن تقليص فقد النيوترونات في مواد بنية المفاعل فإنه من الممكن الحصول على ناتج أفضل من البلوتونيوم. وقد تم تحقيق ذلك في المفاعلات الولودة السريعة (Fast breeder reactors) والتي استفادت من خاصية نووية فريدة للبلوتونيوم. و يوضح شكل (٤-١) عدد النيوترونات المنطلقة لكل نيوترون ممتص لمختلف النظائر الانشطارية عند تغيير طاقة النيوترونات، ويلاحظ من الشكل أنه عندما تكون النيوترونات ذات طاقة منخفضة (أقل من ١ إلكترون فولط) فإن انشطار اليورانيوم ٢٣٣ يعطي الحد الأقصى من النيوترونات. ولكن عندما تكون طاقة النيوترونات ١ ميغا إلكترون فولط فإن النيوترونات المنطلقة من انشطار البلوتونيوم تبدأ في الزيادة بشكل كبير وتصل إلى ٣,٤ عندما تكون طاقة النيوترونات ١٠ ميغا إلكترون فولط . فعندما

- ١١٤ -

يكون عدد النيوترونات المنطلقة أكثر من ٢ نيوترون للانشطار، فإنه من الممكن عندئذ إنتاج مواد انشطارية بشكل أكبر. إن متوسط طاقة النيوترونات المنطلقة في التفاعل الانشطاري هي تقريباً ١,١ ميغا إلكترون فولت (1.1 MeV)، لذلك فإنه باستخدام النيوترونات السريعة ووقود البلوتونيوم يمكن الحصول على نسبة تحول عالية. وفي الحقيقة، فإن نسبة التحول تتجاوز الوحدة، ولهذا فإن هذا النوع من المفاعلات سمي المفاعلات الولودة breeder. وعلى كل، فإنه من الناحية التطبيقية حتى في حالة عدم استخدام مهدئ moderator فإن النيوترونات تهدأ من خلال تصادمها مع مواد البناء ومكونات الوقود نفسه ولهذا فإن نسبة التوليد تعتمد على عدد من عوامل التصميم المختلفة.

ويوضح الجدول (٤-٢) توازن نيوتروني نموذجي في مفاعل ولود سريع يستخدم خليطاً من أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم كوقود. وفي الحالة المستقرة فإن كل ١٠٠ انشطار نووي يؤدي إلى توليد ٢٩٢ نيوتروناً، ونسبة مساهمة كل نظير في عملية الانشطار الكلية هي ٨٤٪ من البلوتونيوم و ١٣٪ من اليورانيوم ٢٣٨ و ٣٪ من اليورانيوم ٢٣٥. وبذلك، فإنه من الـ ٢٩٢ نيوتروناً الناتجة فإن ١٠٠ نيوترون تستخدم لبقاء التفاعل تسلسلياً. وحوالي ١٥٣ نيوتروناً تمتص بواسطة مادة الوقود مما يؤدي إلى إنتاج البلوتونيوم الانشطاري، و ٣٩ نيوتروناً تضيع بامتصاصها في البنية وفي نواتج الانشطار.



شكل (٤-١): التغير في عدد النيوترونات المنطلقة لكل نيوترون ممتص كدالة في طاقة النيوترون.

نيوترونات مفقودة	نيوترونات ممتصة في اليورانيوم والبلوتونيوم بدون انشطار	نيوترونات مسببة لانشطار
مواد البنية ٣٣ نواتج الانشطار ٦	بلوتونيوم ٣٢ يورانيوم ٢٣٨ ١٢١	بلوتونيوم ٨٤ يورانيوم ٢٣٥ ٣ يورانيوم ٢٣٨ ١٣
↓ نواتج التنشيط	↓ إنتاج بلوتونيوم وأكتينيدات أعلى	↓ إنتاج طاقة و ٢٩٢ نيوترون

جدول (٤-٢) التوازن النيوتروني في مفاعل سريع (كل ١٠٠ انشطار ينتج ٢٩٢ نيوترون).

وفي فرنسا، فإن تشغيل المفاعل الولود السريع يستخدم الأوكسيد (أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم) كوقود قد نجح في الحصول على نسبة توليد ١,٢٥ واستخدام وقود يسمح بطيف للنيوترونات السريعة يمكن أن يؤدي إلى نسبة توليد أفضل. فاستخدام خليط من الكربيد والنيتريد كوقود من المتوقع أن يعطي نسبة توليد تتراوح بين ١,٣ و ١,٤، واستخدام سبيكة من فلز البلوتونيوم يمكن أن يعطي نسبة توليد تصل إلى ١,٥ إن مفهوم التوليد يمكن ان يوضح بشكل أكبر في شكل (٤ - ٢) عند دراسة حالة مفاعل ولود بقدر ١٠٠٠ ميغا واط كهرباء. هذه المحطة تحوي ٣ طن من البلوتونيوم، ١٢ طن من اليورانيوم ٢٣٨ كوقود جديد. وتشغيل هذا المفاعل بطاقة ١٠٠٠ ميغا واط لمدة عام سوف يستهلك ما يقارب طن واحد من المواد الانشطارية. والوقود المستهلك سوف يحوي ٣,٢٥ طن من البلوتونيوم، و طن واحد من نواتج الانشطار، و ١٠,٧٥ طن من اليورانيوم ٢٣٨. ولهذا فإن هناك محصولا صافيا من البلوتونيوم ناتج من تحول اليورانيوم ٢٣٨. فمن ٣,٢٥ طن بلوتونيوم فإن ٣ طن سوف تستغل في المفاعل نفسه لانتاج الطاقة، ولكن ٠,٢٥ طن يمكن أن تستخدم في مفاعل جديد آخر. ولهذا فإن استخدام البلوتونيوم مع المفاعلات الولودة السريعة يمكن أن يؤدي إلى مضاعفة قدرة الطاقة النووية في أي بلد. وفي الهند، فإن موارد اليورانيوم التي تقدر بـ ٨٦٠٠٠ طن يمكن استخدامها لتشغيل مفاعلات ماء ثقيل مضغوط ذات قدرة ١٠٠٠٠ - ١٢٠٠٠ ميغا واط كهرباء. وعلى كل، فإن اليورانيوم المستنزف المتبقي والبلوتونيوم الناتج في هذه المفاعلات يمكن استخدامه في مفاعلات ولودة سريعة معطيا قدرة تصل ٣٥٠٠٠٠ ميغا واط كهرباء. ولهذا فإن الاستفادة من البلوتونيوم هو أحد العناصر الهامة لبرنامج الطاقة النووية الهندية.



شكل (٤-٢): مفهوم التوالد موضح بوقود أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم لمفاعل FBR بحجم ١٠٠٠ ميغاواط .

خواص البلوتونيوم Properties of Plutonium

الخواص النووية Nuclear Properties

أثناء إنتاج الطاقة في المفاعلات، فإن اليورانيوم والبلوتونيوم يخضعان إلى عدد من التفاعلات النووية مع النيوترونات، التي تؤدي إلى إنتاج نظائر البلوتونيوم. ومن هذه النظائر البلوتونيوم ٢٣٨ و ٢٣٩ و ٢٤٠ و ٢٤١ و ٢٤٢، وجميعها نظائر مشعة. وجميعها عدا البلوتونيوم ٢٤١ تتفكك بانبعاث جسيمات ألفا. أما البلوتونيوم ٢٤١ فيتفكك بانبعاث جسيمات بيتا متحولاً إلى عنصر ما بعد اليورانيوم وهو الأميريشيوم ٢٤١ (^{241}Am). وعدد كبير من النظائر التي تبعث جسيمات ألفا من الأكتينيدات أيضاً تتفكك بالانشطار التلقائي (Spontaneous fission) الذي ينتج عنه نواتج انشطارية ونيوترونات. ويبين

جدول (٣-٤) بعض المعلومات النووية لنظائر البلوتونيوم. إن الكمية النسبية لهذه النظائر في البلوتونيوم المفصول من الوقود المستهلك تعتمد على درجة احتراق الوقود. فإذا كان الاحتراق منخفضاً (١٠٠٠ ميغا واط.يوم/طن). كما هو الحال في معظم مفاعلات الأبحاث مثل مفاعل سيروس CIRUS ومفاعل دروفا DHRUVA ، فإن محتوى نظير البلوتونيوم ٢٣٩ (^{239}Pu) هو تقريباً ٩٥ ٪. أما في مفاعلات الماء الخفيف حيث أن درجة الاحتراق تصل إلى ٣٥ ٠٠٠ ميغا واط.يوم/طن ، فإن محتوى نظير البلوتونيوم ٢٣٩ هو ٦٠ ٪ تقريباً. ويعرض الجدول (٤-٤) بيانات نموذجية لبعض مفاعلات الطاقة.

النظير	عمر النصف بالسنوات			النشاط النوعي بوحدة بكريل / جم (dps/g)
	α ألفا	β بيتا	انشطارات تلقائي	
^{238}Pu	87.74	-	4.77×10^{10}	6.34×10^{11}
^{239}Pu	2.41×10^4	-	-	2.3×10^9
^{240}Pu	6.57×10^3		1.34×10^{11}	8.39×10^9
^{241}Pu	-	14.4	-	3.81×10^{12}
^{242}Pu	3.76×10^5	-	6.75×10^{11}	1.45×10^8

جدول (٣-٤) : الخواص النووية لنظائر البلوتونيوم.

إن الانشطار النووي هو أحد أهم الخواص النووية لنظائر البلوتونيوم حيث يتميز بمقطع عرضي كبير للانشطار (أي باحتمال كبير لحدوث الانشطار). ومن بين النظائر الخمسة المذكورة، فإن البلوتونيوم ٢٣٩ و ٢٤١ هما فقط اللذان ينشطران بالنيوترونات الحرارية (Thermal neutrons). أما بقية النظائر فتعمل كمواد ماصة، ولكن في المفاعلات السريعة فإن النظائر الأخرى للبلوتونيوم يحدث لها انشطار بالنيوترونات السريعة وتساهم في إنتاج الطاقة. والمقاطع العرضية لانشطار نظائر البلوتونيوم ٢٣٩ و ٢٤٠ و ٢٤١ و ٢٤٢ بواسطة النيوترونات السريعة هي ١,٩ و ٠,٤ و ٢,٦ و ٠,٣ بارن على الترتيب.

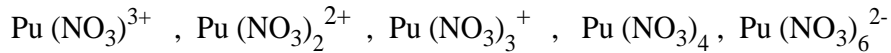
النسبة الوزنية لنظائر البلوتونيوم عند تفريغ الوقود					متوسط درجة الاحتراق بوحدة ميغا واط . يوم / طن MWd/te	نمط المفاعل
²⁴² Pu	²⁴¹ Pu	²⁴⁰ Pu	²³⁹ Pu	²³⁸ Pu	3,000	ماجنوكس MAGNOX
0.3	2.7	16.9	80.0	0.1		
1.5	5.3	26.5	66.3	0.4	7,000	كاندو CANDU
5.0	9.9	30.8	53.7	0.6	18,000	مفاعل مبرد بالغاز AGR
3.3	10.6	23.7	59.8	2.6	27,500	مفاعل الماء المغلي BWR
4.9	13.8	23.6	56.2	1.5	33,000	مفاعل الماء المضغوط PWR

جدول (٤-٤) متوسط التركيب النظائري للبلوتونيوم المنتج من وقود اليورانيوم في مفاعلات حرارية.

الخواص الكيميائية Chemical Properties

البلوتونيوم هو أحد العناصر القليلة في الجدول الدوري التي تتميز بخصائص كيميائية معقدة. ويوضح التركيب الإلكتروني للبلوتونيوم أن المدارات الخامس والسادس والسابع لذرة البلوتونيوم ممتلئة جزئياً، ولهذا فإن الإلكترونات في هذه المدارات يمكن أن تساهم في التفاعلات الكيميائية. ويمكن أن يوجد البلوتونيوم بتكافؤ ثلاثي ورباعي وخماسي وسداسي. ففي حالة التكافؤ الخماسي والسداسي يوجد البلوتونيوم بشكل Pu^{5+} و Pu^{6+} أو PuO_2^{2+} ، PuO_2^{+} . وفي المحاليل المائية فإن PuO_2^{2+} و PuO_2^{+} هما فقط الشكلان المستقران. والبلوتونيوم هو العنصر الوحيد الذي تتشابه حالات تكافئه إلى حد كبير، ويمكن أن تتواجد مع بعضها في نفس المحلول. وتحت ظروف خاصة فإنه من الممكن تثبيت حالة أيونية معينة. مثال ذلك، البلوتونيوم رباعي التكافؤ الذي يكون في أكثر حالاته استقراراً في محلول حمض النيتريك.

وأيونات البلوتونيوم لديها قابلية لتكوين معقدات مع الأنيونات. فعلى سبيل المثال فإن البلوتونيوم الرباعي يمكن أن يكون المعقدات التالية في حمض النيتريك:



الخواص الانتقائية للتأكسد والاختزال، وكذلك خواص تكوين المعقدات هي جوانب مهمة في تصميم طرق فصل واستخلاص العنصر. ويمكن أن يكون أيون البلوتونيوم معقدات مع عدد من المركبات العضوية مثل الإيثرات والكيثونات وثلاثي بيوتائل الفوسفات. فالمركبات مثل: $Pu(NO_3)_4 \cdot 2TBP$ هي مركبات ذوابة في الوسط العضوي، ولهذا فهي الأساس لكثير من عمليات الفصل.

إعادة معالجة الوقود Fuel Reprocessing

إعادة معالجة الوقود تهدف إلى فصل البلوتونيوم الثمين وكذلك استخلاص المتبقي من اليورانيوم في الوقود المستهلك. وهذه الخطوة تساعد في فصل النظائر ذات النشاط الإشعاعي الشديد من نواتج الانشطار، التي يمكن بالتالي حفظها وتخزينها والتخلص منها بطريقة سليمة. إن نواتج الانشطار التي أُبقيت داخل الوقود حتى هذه المرحلة يجب التعامل معها بعناية فائقة، وذلك باتخاذ احتياطات كبيرة في جميع مراحل إعادة المعالجة. إن الوقود المستهلك يتميز بنشاط إشعاعي نوعي مرتفع للغاية يصل إلى عدة ملايين من الكيوري للطن الواحد. ولهذا فإن جميع العمليات التي تجرى للوقود المستهلك تتم عن طريق التحكم عن بعد وذلك لتقليل تعرض العاملين للإشعاع.

وتتراكم نواتج الانشطار أثناء استخدام الوقود لإنتاج الطاقة. ويوضع الوقود المستهلك، بمجرد إخراجهِ من المفاعل، في برك مياه ذات تصميم خاص، وذلك حتى ينخفض النشاط الإشعاعي لنواتج الانشطار ذوات عمر النصف القصير. ويعمل الماء هنا كمبرد حيث أن التبريد مهم جداً وكحاجز واقٍ من الإشعاع. وبعد مضي ما يقارب السنة ينقل الوقود المستهلك من البركة إلى مركز معالجة الوقود في حاويات مدرعة ذات تصميم خاص، بحيث أن محتوياته من المواد المشعة لا يمكن أن تتسرب إلى البيئة، حتى في حالة أسوأ الحوادث المتوقعة. وعند وصول حاويات الوقود المستهلك إلى مركز المعالجة تفرغ في برك ماء. ويجب أن تجرى عمليات معالجة الوقود في مباني ذات تصميم خاص يضمن أقصى درجات السلامة الإشعاعية للعاملين فيها. ويتم بناء الجدران الخرسانية لخلايا المعالجة بسماكة ٦ أقدام (حوالي مترين) وتبطن بفلو لاذ غير قابل للصدأ. ونظراً لأن هذه الخلايا سوف تلوث إشعاعياً ولن يكون من الممكن من الناحية العملية الوصول إليها لإصلاحها، لذا تصمم التجهيزات بحيث لا تحتاج إلى تغيير أو صيانة أثناء عمرها الافتراضي. ومع ذلك، يجب أن يأخذ

التصميم في الحسبان إمكانية استبدالها بطريقة التحكم عن بعد، عندما يكون تغييرها ضرورياً. ومعظم عمليات المعالجة تكون غير مرئية، إلا أنه في بعض الأجزاء التي تتطلب الملاحظة، فإنه يجب استخدام نوافذ من زجاج رصاصي سميك. كما تستخدم الدوائر التلفزيونية المغلقة لمتابعة بعض العمليات.

في المراحل البدائية لإعادة معالجة الوقود يستخدم عدد من الطرق. إلا أن طريقة البيوركس (PUREX)، وتعني الاستخلاص الاختزالي للبلوتونيوم واليورانيوم (Plutonium Uranium Reduction Extraction) أصبحت هي الأكثر شيوعاً لاستخلاص البلوتونيوم من الوقود المستهلك. ونواتج الانشطار الموجودة أثناء عملية المعالجة هي عناصر الغازات الخاملة والفلزات القلوية وفلزات القلويات الأرضية والعناصر الأرضية النادرة وعدد من العناصر الانتقالية مثل المولبدنيوم والروديوم والنيوبيوم والزركونيوم وغيرها، وهي تغطي تقريباً نصف الجدول الدوري. ولهذا فإن عملية المعالجة يجب أن تتضمن تنقية اليورانيوم والبلوتونيوم من نواتج الانشطار المذكورة. ويمكن شرح مبادئ العمليات الأولية للمعالجة والخطوات المتضمنة في عملية البيوركس فيما يلي.

العمليات المبكرة *Early Processes*

في الدراسات المبكرة لفصل كميات قليلة بالميكروجرام من البلوتونيوم طور العالم سيبورج (G. T. Seaborg) وزملاءه طريقة انتقائية لترسيب البلوتونيوم مع فوسفات البزموت (bismuth phosphate). وقد تم تنقية البلوتونيوم من راسب فوسفات البزموت بإعادة الإذابة والترسيب بالاستفادة من خاصية أن البلوتونيوم رباعي التكافؤ يترسب مع البزموت، أما سداسي التكافؤ فلا يترسب. وقد استخدمت هذه العملية في الولايات المتحدة الأمريكية لفصل البلوتونيوم المطلوب بشكل أساسي لإنتاج الأسلحة النووية، إلا أن هذه الطريقة حل محلها فيما بعد طريقة الاستخلاص بالمذيبات (Solvent extraction). ومن

أول المذيبات المستخدمة في عملية الاستخلاص هو إيزو بيوتيل مثيل كيتون (methylisobutyl keton) أو ما يعرف بالهكسون (hexone)، حيث استخدم كمستخلص في عملية معالجة الوقود المستهلك. ولهذا المذيب القابلية لاستخلاص اليورانيوم والبلوتونيوم إلى الوسط العضوي مع ترك نواتج الانشطار الأخرى (أنظر الجدول ٤ - ٥). ومن معوقات هذا المذيب نقطة الوميض (flash point) المنخفضة التي تبلغ ٦٠ درجة مئوية، وكذلك تفاعله مع حمض النيتريك. لذا، فقد استبدل به مذيبات أخرى. وقد استخدم إيثيل الإيثير (Ethyl ether) لوقت طويل لاستخلاص اليورانيوم، إلا أنه لا يمكن استخدام هذه المادة في عملية معالجة الوقود لكونها مادة متطايرة ولطبيعتها التفاعلية. وهناك إيثير آخر هو ثنائي بيوتيل كاربيتول (dibutyl carbitol) الذي يتميز بقلّة تطايره وقلّة تفاعله مع حمض النيتريك، وقد استخدم بنجاح في عملية معالجة الوقود المستهلك في المملكة المتحدة.

المحلول	نواتج انشطار (FP)	بلوتونيوم ثلاثي Pu (III)	بلوتونيوم رباعي Pu (IV)	بلوتونيوم سداسي Pu (VI)	يورانيوم سداسي U (VI)
هكسون	6×10^{-4}	4.5×10^{-4}	1.6×10^{-2}	7.6	1.5
ثلاثي بيوتال الفوسفات	2×10^{-3}	2×10^{-2}	1.5	0.6	8.0

جدول (٤-٥): معاملات التوزيع (Distribution Coefficients)

لليورانيوم والبلوتونيوم في الهكسون (Hexone)

وثلاثي بيوتال الفوسفات (Tributyl phosphate).

عملية الاستخلاص الاختزالي للبلوتونيوم واليورانيوم (Purex)

الغرض من هذه العملية هو استخلاص اليورانيوم والبلوتونيوم كمياً وبنقاوة عالية من عناصر نواتج الانشطار. ويجب أن تكون درجة الاسترجاع عالية لهذه المواد الانشطارية القيمة، وكذلك للمواد الخسبة (القابلة للانشطار)، وذلك لضمان منع تسربها مع النفايات التي يجب أن تعالج فوراً بعد ذلك ويتم التخلص منها بطرق آمنة. ويمكن أن تصنف عمليات إعادة معالجة الوقود المستهلك في الخطوات الرئيسية التالية:

(١) إخراج الوقود من الأغلفة الخاصة به وإذابته.

(٢) استخلاص اليورانيوم والبلوتونيوم.

(٣) فصل اليورانيوم والبلوتونيوم عن بعضهما البعض ثم تنقيتهما.

(٤) إعادة استخدام المذيبات.

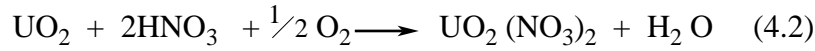
(٥) تداول النفايات.

ويوضح شكل (٤-٣) مخططاً نموذجياً لهذه الخطوات.

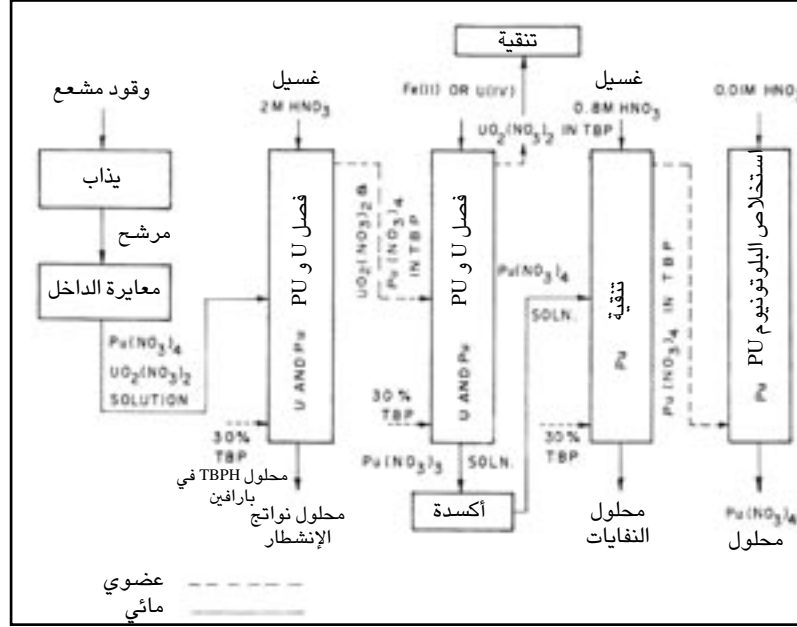
إزالة أغلفة الوقود وإذابته Fuel Decladding and Dissolution

لاستخلاص البلوتونيوم من الوقود المستهلك فإنه لابد من إذابة الوقود المشع. وخلال هذه الخطوة فإنه من المفضل في البداية نزع أغلفة الوقود وذلك لتسهيل الخطوات التالية. وأحد الطرق المستخدمة لإزالة الأغلفة هي طريقة النزع الميكانيكي المباشرة لمادة الغلاف وهي مستخدمة في معاملة وقود المفاعلات المبردة بالغاز. والطريقة الأخرى للتخلص من الأغلفة هي إذابتها بمذيب لا يؤثر على مادة الوقود. فوود مفاعلات الأبحاث في مفاعلي سيروس (CIRUS) ودروفا (DHRUVA) عادة ماتغلف بمادة الألومنيوم، وبالتالي يمكن إذابة الألومنيوم بمحلول هيدروكسيد الصوديوم. ويبقى اليورانيوم وأكسيد

اليورانيوم دون أن يتأثراً. أما في حالة كون الوقود مغلف بسببكية من الزركونيوم أو من مادة الفولاذ المقاومة للتآكل، فإنه يصعب إذابتها. ولهذا فإن مادة الوقود التي تكون عادة من أكسيد اليورانيوم أو أكسيد البلوتونيوم هي التي تذاب بمذيب انتقائي لايؤثر في مادة التغليف بحيث تذوب مادة الوقود وتبقى مادة التغليف. وفي هذه الطريقة فإن أعمدة الوقود تقطع إلى قطع صغيرة في حدود ٥ سم ثم تعامل بمذيبات. وتعرف هذه الطريقة بطريقة القطع والإذابة (Chop-leach). وتتم الإذابة باستخدام حمض النيتريك عند درجة حرارة ١٠٠ درجة مئوية، وهنا يحدث التفاعل التالي:



وتتم عملية الإذابة هذه في وجود الهواء وذلك لتقليل فقد حمض النيتريك على شكل أكسيد النيتروجين. ويذوب كل من اليورانيوم وأكسيد اليورانيوم بسهولة، أما أكسيد البلوتونيوم فإنه يسبب بعض الصعوبات عند إذابته عندما يكون موجوداً بكمية كبيرة (أكبر من ٢٠٪). بالإضافة إلى ذلك فإن الوقود المستهلك بدرجة كبيرة يحوي بعض المعادن من نواتج الانشطار التي لا تذوب. وبعد إجراء عملية الإذابة يتم فصل مادة الأغلفة التي تبقى كما هي ثم بعد ذلك يتم ترشيح المحلول للتخلص من العوالق ثم تتم معاملته للحصول على اليورانيوم والبلوتونيوم.



شكل (٤ - ٣): شكل توضيحي لعمل البيوركس لاستخلاص البلوتونيوم.

استخلاص اليورانيوم والبلوتونيوم *Extraction of Uranium and Plutonium*

تتحد أيونات اليورانيوم والبلوتونيوم مع أيونات النترات لتنتج أملاحاً متعادلة. من هذه الأملاح يمكن استخلاص نترات البلوتونيوم رباعي التكافؤ $Pu(NO_3)_4$ ونترات اليورانيوم سداسي التكافؤ $UO_2(NO_3)_2$ بشكل فوري بواسطة ثلاثي بيوتيل الفوسفات، (أنظر الجدول ٤ - ٥). ويستخدم ثلاثي بيوتيل الفوسفات الذي هو مذيب هيدروكربوني ذو سلسلة طويلة في عملية الاستخلاص. وقبل البدء في عملية الاستخلاص يجب التأكد أن البلوتونيوم موجود في حالة التكافؤ الرباعي، ويتم ذلك بمعاملة المحلول بأكاسيد النيتروجين أو بنترات الصوديوم التي تثبت البلوتونيوم رباعي التكافؤ ولا تؤثر على اليورانيوم الذي يبقى في حالة التكافؤ السداسية. ويتم التحكم بتركيز الحمض بعد الإذابة بحيث يكون أكثر ملاءمة لاستخلاص اليورانيوم

والبلوتونيوم وأقل ملائمة لاستخلاص نواتج الانشطار الأخرى. ويمرر المحلول في عمود الفصل حيث يتم استخلاص ٩٩,٩٪ من اليورانيوم و ٩٩,٩٨٪ من البلوتونيوم في الطور العضوي مع أقل من ٠,٥٪ من نواتج الانشطار. ومن الاحتياطات الهامة التي يجب مراعاتها عند التعامل مع مواد انشطارية بتراكيز عالية مثل البلوتونيوم هو مراقبة الحرج النووي. وتحت أفضل الظروف، فإن أقل من ٥٠٠ جرام من البلوتونيوم في المحلول يكفي لبدء و استمرار التفاعل الانشطاري التسلسلي، وهذا قد يؤدي لتسخين المحلول وإحداث خلل في النظام والتجهيزات. وفي أسوأ الظروف ينتج ضغط كاف لإحداث انفجار غير نووي. ولذلك فإن أي منشأة تتعامل مع المواد الانشطارية تصمم بحيث أن الظروف التي تؤدي إلى الوصول للكتلة الحرجة يجب ألا تحدث حتى إذا كان ذلك عن غير قصد. وفي بعض تجهيزات هذه المنشآت مثلاً توضع مواد ماصة للنيوترونات مثل البورون أو الكادميوم في خزان الإذابة أثناء التصميم وذلك لمنع بدء التفاعل التسلسلي.

فصل اليورانيوم والبلوتونيوم وتنقيتهما

Partitioning of U & Pu and their Subsequent Purification

يعتمد فصل اليورانيوم والبلوتونيوم على عدم قابلية البلوتونيوم ثلاثي التكافؤ للاستخلاص بواسطة فوسفات ثلاثي البيوتيل. فإذا كانت الطبقة المائية الملامسة للطبقة العضوية (طبقة الـ TBP) تحوي عاملاً مختزلاً مثل كبريتات الحديدوز (الحديد الثنائي) أو نترات اليورانيوم (رباعي التكافؤ)، فإن هذه العوامل تختزل البلوتونيوم الرباعي التكافؤ إلى البلوتونيوم الثلاثي التكافؤ انتقائياً دون التأثير على اليورانيوم. واختزال البلوتونيوم يجعله يستخلص مرة أخرى في الطور المائي تاركاً اليورانيوم في الطور العضوي. يحوي كلاً من اليورانيوم والبلوتونيوم في هذه المرحلة بعضاً من نواتج الانشطار، لذا فهما يحتاجان إلى تنقية إضافية. وعادة تتم تنقية اليورانيوم بواسطة دورة أخرى

من عملية الاستخلاص بالمذيبات. أما تنقية البلوتونيوم فتتم إما بالاستخلاص بالمذيبات وإما بطريقة التبادل الأنيوني (anion exchange). فممنشأة معالجة الوقود في ترمبي (Trombay) في الهند تستخدم طريقة التبادل الأنيوني، في حين المنشأة في تارابور تستخدم طريقة الاستخلاص بالمذيبات لتنقية البلوتونيوم. وعندما يزيد تركيز حمض النيتريك إلى ٧ مول فإن أيونات البلوتونيوم تتحد مع ٦ أيونات نترات (Nitrate) لينتج أنيونات من النوع $\text{Pu}(\text{NO}_3)_6^{2-}$. وهناك عدد قليل جداً من أيونات المعادن التي تنتج هذا النوع من الأنيونات. ولهذا فإن فصل البلوتونيوم من عدد كبير من الشوائب يمكن أن يتم بطريقة التبادل الأنيوني. فعندما يمرر محلول من البلوتونيوم الرباعي المذاب في ٧ مولار حمض نيتريك في عمود فصل مملوء بمبادل أنيوني فإن البلوتونيوم سوف يبقى انتقائياً على المبادل، ثم بعد ذلك يتم تحرير البلوتونيوم من عمود المبادل بواسطة تمرير حمض النيتريك المخفف بتركيز ٠,٥ مول.

إعادة استخدام المذيبات Solvent Recycling

يتعرض مذيب فوسفات ثلاثي البيوتيل TBP وكذلك المذيبات العضوية الأخرى المستخدمة في إعادة معالجة الوقود لجرعات عالية من الإشعاعات الصادرة من نواتج الانشطار فينتج عنه تحلل المذيب. ولبعض نواتج التحلل هذه تأثير ملحوظ على خواص الاستخلاص لبعض المذيبات. ولتقليل تكلفة إعادة معالجة الوقود وكذلك لتقليل كمية النفايات فقد جرت العادة على استخدام المذيبات عدة مرات قبل التخلص منها. ولكي يعاد استخدام هذه المذيبات فإنه من الضروري معاملتها للتخلص من نواتج التحلل المذكورة. ومن الطرق الأكثر شيوعاً المستخدمة لهذا الغرض الغسيل بمحلول كربونات الصوديوم، ثم بعد ذلك يغسل بمحلول مخفف من حمض النيتريك قبل إعادة استخدام هذه المذيبات.

تداول النفايات Waste Handling

يخرج النشاط الإشعاعي المتولد عن عملية إنتاج الطاقة النووية بأكمله أثناء معالجة الوقود المستهلك، ومن ثم يتم توجيهه إلى مسار النفايات الناتجة. وهناك نفايات غازية و سائلة و صلبة. ولا يمكن التخلص من أي من هذه النفايات في البيئة دون التخلص من النشاط الإشعاعي الموجود فيها بشكل تام. ولا يتم التخلص من النفايات المحتوية على مستويات إشعاع عالية ومتوسطة إلى البيئة، بل تعالج لتثبيتها وتخزينها بشكل آمن. ومعظم الغازات الناتجة مثل التريتيوم (على شكل ماء) والكربون ١٤ (على شكل ثاني أكسيد الكربون) والكربتون ٨٥ واليود ١٢٩ وغيرها تثبت على الفحم أو أية مادة ممتصة خاصة. وترسل النفايات ذات المستويات الإشعاعية العالية والمتوسطة كل على حدة إلى منشأة خاصة لتثبيتها. وفي هذه المنشأة تبخر النفايات عالية المستوى الأشعاعي وتخلط مع الزجاج وذلك لمزج المواد المشعة داخل مادة الزجاج المنصهر ومن ثم يعبأ الزجاج في براميل من الفولاذ غير القابل للصدأ ثم بعد ذلك يخزن بأمان في أماكن خاصة. كذلك تعامل النفايات متوسطة المستوى الإشعاعي بأسلوب مشابه. أما النفايات منخفضة المستوى الإشعاعي فإنها تعامل لإزالة المواد المشعة منها حتى تصل إلى مستوى أقل من الحد المسموح به من قبل المجلس التنظيمي للطاقة الذرية الهندية (Atomic Energy Regulatory Board (AERB)، ومن ثم يتم التخلص منها في وسط مائي ضخم (نهر أو بحر أو بحيرة). أما مصادر النفايات الصلبة منخفضة المستوى الإشعاعي مثل مواد التغليف وبعض الأجهزة فإنها تعامل بعناية للتخلص منها بالدفن الآمن.

قدرات إعادة معالجة الوقود Capabilities in Fuel Reprocessing

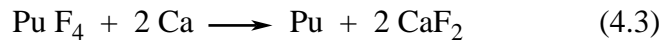
لقد وقعت حكومة الهند اتفاقية مع كندا في ٢٨ أبريل عام ١٩٥٦ م لإنشاء مفاعل سيروس (CIRUS). وفي عام ١٩٥٨ م قررت الهند أن تنشئ منشأة لمعالجة الوقود المشع من ذلك المفاعل. وقد تم التصميم والإنشاء والإنجاز

بالكامل بنجاح في ترومبي بجهود محلية عام ١٩٦٤ م. والهند هي أحد سبع دول في العالم تمتلك هذه التقنية المعقدة لإعادة معالجة الوقود. وعندما بدأ إنشاء مفاعل دروفا، اتخذ قرار لتجديد وتوسيع منشأة معالجة الوقود في ترومبي المخصصة لمعالجة الوقود من مفاعلي سيروس و دروفا. وقد تم ذلك بنجاح، والخبرة التي تم الحصول عليها عند إنشاء منشأة معالجة الوقود في ترومبي كانت مفيدة لإنشاء محطة لإعادة معالجة الوقود بقدرة ١٠٠ طن في السنة في تارابور. وقد صممت هذه المنشأة لإعادة معالجة الوقود من مفاعلات تارابور و كوتا. وتقوم هذه المحطة في الوقت الحاضر بإعادة معالجة الوقود من مفاعلات كوتا وكالبكام. كما أن هناك منشأة حديثة لمعالجة الوقود بنفس القدرة في كالبكام. وهناك مخطط لإنشاء محطات لإعادة معالجة الوقود للوفاء باحتياجات المفاعلات الإضافية التي من المتوقع تركيبها ضمن برنامج الطاقة النووية.

البلوتونيوم ومركباته Plutonium and its Compounds

فلز البلوتونيوم Plutonium Metal

ينتج فلز البلوتونيوم عن تفاعل رباعي فلوريد البلوتونيوم PuF_4 مع فلز الكالسيوم Ca وفق المعادلة :



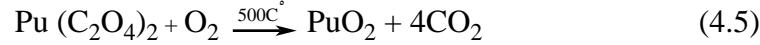
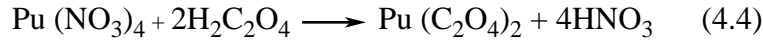
ويعتبر فلز البلوتونيوم أحد الفلزات عالية الكثافة حيث تبلغ كثافته ١٩,٨٦ جرام/سم^٣، وتبلغ درجة إنصهاره ٦٤٠ درجة مئوية. ولكنه يخضع، بين درجة حرارة الغرفة ودرجة إنصاره، لعدة تحولات طورية ذات اختلافات محسوسة في كثافته. ولهذا فإن فلز البلوتونيوم الصلب غير ملائم لاستخدامه مباشرة كوقود للمفاعلات. إلا أن هذا الأمر لا يعتبر عائقاً في استخدامه كوقود حيث أن فلز البلوتونيوم النقي لا يستخدم مطلقاً كوقود للمفاعلات لكونه ذو

محتوى انشطاري عال. ولهذا فإنه عادةً ما يخفف بفلز اليورانيوم أو أي فلز آخر مناسب عند استخدامه وقوداً للمفاعلات.

فلز البلوتونيوم شديد التفاعل، ويتفاعل مباشرة مع الهواء الرطب. ولهذا فإن جميع العمليات التي تتضمن التعامل مع فلز البلوتونيوم تجري في صناديق قفازات معزولة عن الهواء (Inert atmosphere glove boxes).

أكسيد البلوتونيوم (PuO₂) Plutonium Oxide

أكسيد البلوتونيوم هو مادة البدء في تصنيع وقود البلوتونيوم، ويستخدم، كذلك، لتحضير معظم مركباته. والنتائج النهائية لعملية إعادة معالجة الوقود هو محلول من نترات البلوتونيوم. ويتم تحضير أكسيد البلوتونيوم من ذلك المحلول بترسيب الإكسالات Oxalate ومن ثم حرقها :

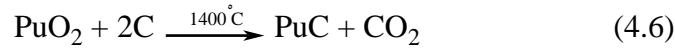


يعتمد لون أكسيد البلوتونيوم على مصدره، وهو يتلون من الأسود المصفر إلى الأخضر. وتبلغ كثافته النظرية ١١,٤٦ جرام/سم^٣، وتبلغ درجة انصهاره ٢٤٠٠ درجة مئوية. وأكسيد البلوتونيوم مستقر إلى حد ما تحت ظروف التشعيع بالنيوترونات ومرشح قوي لاستخدامه كوقود نووي. ولكونه مادة خزفية فإن توصيلته الحرارية منخفضة ولكنه يعوض ذلك بدرجة انصهاره المرتفعة إلى حد كبير.

كربيد البلوتونيوم (PuC) Plutonium Carbide

تعتبر كربيدات البلوتونيوم ذات أهمية في الحصول على نسبة توليد عالية في المفاعلات الولودة السريعة. والبلوتونيوم أحادي الكربيد (Monocarbide)، الذي يحوي ذرة كربون بدلاً من ذرتي أكسجين في أكسيد البلوتونيوم له قدرة أقل على تهدئة النيوترونات في المفاعلات السريعة، ويؤدي ذلك إلى نسبة توليد

أعلى . كذلك، فإن التوصيلية الحرارية للبلوتونيوم أحادي الكبريد أعلى منها في أكسيد البلوتونيوم، وذلك يفيد في تقليل كمية المواد المستخدمة في المفاعلات الولودة السريعة. ويمكن الحصول على البلوتونيوم أحادي الكبريد بالتفاعل المباشر بين فلز البلوتونيوم وغاز الميثان (methane) ، إلا أن الطريقة الأكثر شيوعاً هي الاختزال الحراري لأكسيد البلوتونيوم بالكربون كما في المعادلة:



والكثافة النظرية للبلوتونيوم أحادي الكبريد هي ١٣,٥٨ جرام/سم^٣. ودرجة إنصهاره ١٦٥٤ درجة مئوية. ووجود كمية زائدة من الكربون يمكن أن يؤدي إلى تكون أنماط أخرى من الكبريد مثل Pu₂C₃ و PuC₂.

نيتريد البلوتونيوم (PuN) *Plutonium Nitride*

يعتبر نيتريد البلوتونيوم وقوداً متطوراً للمفاعلات الولودة السريعة، ولديه القابلية لنسبة توليد عالية. ويمكن تحضيره بالتفاعل المباشر بين فلز البلوتونيوم وغاز النيتروجين أو بواسطة الاختزال الحراري لأكسيد البلوتونيوم بالكربون في وسط من غاز النيتروجين حسب التفاعل :



وتبلغ كثافته نيتريد البلوتونيوم ١٤,٢٢ جرام/سم^٣ ، ويتفكك إلى البلوتونيوم والنيتروجين عند درجة حرارة أعلى من ١٦٠٠ درجة مئوية، ولا تتكون نيتريدات أعلى من النيتريد الأحادي.

البلوتونيوم رباعي الفلور (PuF_4) *Plutonium Tetrafluoride*

البلوتونيوم رباعي الفلور هو المادة التي يبدأ بها تحضير فلز البلوتونيوم، ويتم تحضيرها من أكسيد البلوتونيوم بمعاملة بفلوريد الهيدروجين وفق المعادلة:



ورباعي فلوريد البلوتونيوم وردي اللون وكثافته تقدر بـ ٦,٧٥ جرام/سم^٣، ودرجة انصهاره ١٠٢٧ درجة مئوية.

الوقود المعتمد على البلوتونيوم *Plutonium Based Fuels*

يمكن أن يستخدم البلوتونيوم المستخلص من إعادة معالجة الوقود كمادة انشطارية في المفاعلات الحرارية أو المفاعلات الولودة السريعة. وهناك عدد من الدول تبحث امكانية استخدام خليط من أكسيد (MOX) اليورانيوم والبلوتونيوم تحوي مايقارب ٤٪ من أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) كوقود لمفاعلات الماء الخفيف. ولهذا الغرض، فإنه لا حاجة لليورانيوم المثرى، لأن البلوتونيوم يغني عن اليورانيوم ٢٣٥. وبالفعل فقد استبدلت بعض حزم اليورانيوم المثرى بحزم من الأكسيد في وقود مفاعلات تابس (TAPS). يستخدم البلوتونيوم كما ذكر سابقاً بكفاءة أكثر في المفاعلات الولودة السريعة، حيث أن الخواص النووية للبلوتونيوم تعطي نسبة توليد عالية عندما تستخدم النيوترونات السريعة. وأغلب الوقود المستخدم في المفاعلات الولودة السريعة يتكون من خليط من أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم حيث يحوي ٢٥٪ من ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) وهو المستخدم في مفاعل (PFR) في المملكة المتحدة بقدرة ٢٥٠ ميغا واط وكذلك مفاعل (Super Phoenix) الفرنسي بقدرة ١٢٠٠ ميغا واط، ومفاعل BN600 الروسي (الاتحاد السوفيتي سابقاً)، بطاقة ٦٠٠ ميغا واط. وقد صنع وقود هذه المفاعلات بعمليات مشابهة لتصنيع أكسيد اليورانيوم، حيث تخلط بودرة أكسيد اليورانيوم مع بودرة أكسيد

البلوتونيوم ثم يستخدم الخليط لتصنيع أقراص الوقود بقطر يتراوح بين ٥ و ٨ مم. بعد ذلك تعبأ الأقراص في أنبوب من الفولاذ لصنع قضبان الوقود. وتتم جميع هذه العمليات حتى إنتاج قضبان الوقود باستخدام صندوق القفازات، للتأكد من العزل المحكم. ولا يمكن السماح لبودرة أكسيد البلوتونيوم بالتسرب إلى جو المختبر أو ملامسة أي من العاملين. ويفترض في صندوق القفازات أن يوفر مثل هذه الحماية رغم أنه يصعب عملية تصنيع الوقود إلى حد ما. وبعد ذلك تجرى عملية تنظيف للسطح الخارجي لقضبان الوقود ويتم إخراجها من صندوق القفازات وذلك لعمل حزم قضبان الوقود.

ولقد أظهر وقود الأكسيد أداءً جيداً إلى مستوى من الاحراق يصل إلى ١٥٠٠٠٠ ميغا واط. يوم/طن. أما نسبة التوليد التي أمكن الحصول عليها عند استخدام هذا الوقود فهي ١,٢٥ فقط، وهي تحد من معدل تشغيل المفاعلات المعتمدة على البلوتونيوم المنتج في المفاعلات الولودة السريعة. ففي الهند التي تتضاعف فيها الحاجة بشكل سريع للطاقة فإنها تحتاج نسبة توليد عالية للبلوتونيوم للوفاء باحتياجاتها الكبيرة من الكهرباء، وعليها أن تنظر إلى الوقود الذي يعطي أعلى نسبة توليد. وعلى الرغم من ذلك، واعتماداً على الخبرة العالمية حتى هذه المرحلة، فقد اختبر خليط الأكاسيد كوقود في مفاعل ولود سريع تجريبي بقدرة ٥٠٠ ميغا واط كهرباء.

ويصنع الوقود المتطور مثل خليط الكربيدات وخليط النيتريدات بالاختزال الحراري بالكربون (carbothermic reduction process)، حيث تكون المواد التي تبدأ بها هذه العملية هي مزيج متماثل من أكاسيد اليورانيوم والبلوتونيوم التي تخلط مع الكربون، ويسخن الخليط تحت التفريغ عند درجة حرارة ١٤٠٠ درجة مئوية تقريباً لإنتاج الكربيدات، أو يسخن عند درجة حرارة ١٥٠٠ درجة مئوية في وسط من غاز النيتروجين لإنتاج النيتريدات. ويطحن المنتج لتحويله إلى بودرة ناعمة ويشكل على هيئة أقراص حسب الحجم المطلوب، ثم يغلف في

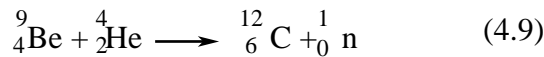
أنابيب من الفولاذ (لاستخدامه كوقود). وجميع هذه العمليات تتم في صندوق القفازات في جو معزول في وسط من غاز النيتروجين أو الأرجون. وهذا مهم جداً لأن كربيدات ونيتريدات اليورانيوم والبلوتونيوم ذات نشاط تفاعلي شديد ويمكن أن تتلف عند تعرضها للرطوبة الموجودة في الهواء. وكذلك، فإن البودرة الناعمة لديها قابلية للاشتعال في وجود الأكسجين. وفي الوقت الحاضر، توجد خبرة محدودة في استخدام وقود الكريد أو النيتريد في المفاعلات الولودة السريعة. وفي الحقيقة فإن الهند هي أول بلد في العالم يستخدم وقوداً من خليط كربيدات في مفاعلها الولود السريع التجريبي (Fast Breeder Test Reactor (FBTR) في كلبكام (Kalpakkam). والهند لا تزال تبحث إمكانية استخدام وقود النيتريد في مفاعل (FBTR)، وفي مرحلة لاحقة في مفاعل تجريبي من المفاعلات الولودة السريعة.

ولقد استخدم فلز اليورانيوم وسبائكه كوقود في بعض أوائل المفاعلات الولودة السريعة التي أنشئت بغرض الأبحاث في مجال تقنية هذه المفاعلات. أما سبائك البلوتونيوم فلم يتم استخدامها حتى الوقت الحاضر. وفي الولايات المتحدة الأمريكية فقد شععت بنجاح سبيكة تتكون من ٧٥٪ يورانيوم و ١٥٪ بلوتونيوم و ١٠٪ زركونيوم في مفاعل ولود سريع تجريبي.

تطبيقات البلوتونيوم الأخرى Other Applications of Plutonium

مصادر النيوترونات Neutron Sources

صنعت مصادر النيوترونات في الثلاثينات من القرن العشرين وذلك بتجميع عنصر الراديوم مع بودرة البريليوم، حيث تتفاعل جسيمات ألفا (α - Particles) المنطلقة من الراديوم مع البريليوم لتعطي نيوترونا وفق التفاعل:



وعلى كل، فإنه بسبب وجود نويدات تبعث جسيمات بيتا وأشعة جاما مصاحبة لسلسلة تفكك الراديوم والرادون فإن استخدام هذه المصادر أصبح أمراً مرهقاً وغير مرغوب فيه. ولهذا فإن استبدال الراديوم / رادون بالبلوتونيوم قد أدى إلى تطوير مصادر نيوترونات مأمونة يمكن استخدامها في مختبرات الأبحاث. ولهذا الغرض فإنه يمكن استخدام أكسيد البلوتونيوم بحيث يخلط مسحوقه بشكل تام مع بودرة فلز البرليوم أو تستخدم سبيكة من البلوتونيوم والبرليوم ثم بعد ذلك يغلف هذا المصدر في كبسولة من الفولاذ لضمان الأمان أثناء تداوله.

مولدات الطاقة النظائية Isotope Power Generator

عمر النصف للبلوتونيوم ٢٣٨ هو ٨٧,٧ سنة ويتفكك بانبعثات جسيمات ألفا. ويمكن تحويل طاقة جسيمات ألفا المنبعثة منه إلى حرارة. ويعطي جرام واحد من البلوتونيوم ٢٣٨ قدرة حرارية مقدارها ٠,٥٥ واط. وهذه الحرارة يمكن استخدامها لتوليد كمية قليلة من الكهرباء بمساعدة جهاز كهربائي حراري Thermoelectric. ولهذا، فإنه يمكن أن يصنع من البلوتونيوم ٢٣٨ بطارية طاقة لأغراض خاصة. وأحد تطبيقات بطاريات البلوتونيوم ٢٣٨ الهامة هو استخدامها في جهاز تنظيم ضربات القلب، وكذلك استخدامها لتوفير الطاقة للعديد من الأقمار الصناعية. وقد صنع عدد من هذه البطاريات بقدرات تتراوح بين ٠,٢ و ٣٠ واط.

جوانب السلامة في التعامل مع البلوتونيوم Safety Aspects of Plutonium

كثيراً ما يكون اسم البلوتونيوم مصدراً رعب لكثير من الناس. والبلوتونيوم عنصر مشع، ويجب أخذ احتياطات كبيرة عند التعامل معه. ويجب أن تجرى جميع العمليات التي يدخل فيها البلوتونيوم في صناديق خاصة مصممة لذلك. ولا يسمح للبلوتونيوم أن يتسرب إلى هواء المختبر. ويجب أن يقوم المسؤول عن الفيزياء الصحية بمراقبة دائمة لأي تلوث للهواء بهذا العنصر

لضمان أمان العاملين في المختبرات. ويمكن اكتشاف أي تسرب للبلوتونيوم بسهولة حيث أن واحد ميكرو جرام منه يعطي ١٤٠٠٠٠ جسيم ألفا في الدقيقة. كما يجب أن يكون التعرض المهني للعاملين في هذا المجال محكوماً بدقة عالية، للتأكد من أن عبء الجسم^١ والمقدر بـ ٠,٦ ميكرو جرام لا يتم تجاوزه مطلقاً. وعبء الجسم هو الكمية التي يمكن أن يحتويها الجسم دون أن تسبب أية تأثيرات ضارة محسوسة. والجرعة المهلكة^٢ من البلوتونيوم تتراوح بين جزء من الجرام إلى بضعة جرامات وتعتمد على المسلك الذي دخلت من خلاله الجسم وعلى صيغتها الكيميائية والفيزيائية. وهذه الكمية أعلى بكثير من بعض السموم المألوفة. لهذا فإن الهواء داخل مختبر البلوتونيوم يجب أن تتم مراقبته بانتظام، وأعلى حد مسموح به لتركيز البلوتونيوم في الهواء هو ٠,٠٠٠٠٣ ميكرو جرام لكل متر مكعب من الهواء.

(١) لم يعد هذا المصطلح متداولاً حيث أن أية كمية مهما قلت فإنها تحمل معها بعض المخاطر والتأثيرات الضارة (المترجمين).

(٢) لم يعد المصطلح متداولاً كذلك لتغير المفهوم (المترجمين).

الفصل الخامس

الثوريوم THORIUM

مقدمة Introductory

تقدر موارد الهند من الثوريوم بخمسة أضعاف مالمديها من اليورانيوم. والثوريوم هو مادة خصبة لإنتاج اليورانيوم ٢٣٣ الانشطاري. وهناك اهتمام كبير بالاستفادة من هذا المورد الطبيعي في إنتاج الطاقة. وتقنية الاستفادة من الثوريوم هي في مرحلة التطوير كي تكون جاهزة عند ماتدعو لها الحاجة.

اكتشف الثوريوم عام ١٩٢٨ م بواسطة الكيميائي المشهور بارون جون جاكوبرزيليوس (Baron Jones Jackobberzelius)، الذي كان أول من استخدم الرموز للعناصر الكيميائية، وأسماه ثوريوم (Thorium) باسم الآلهة الاسكندنافية ثور " Thor ". والثوريوم أكثر وفرة في الطبيعة من اليورانيوم. وأول تطبيق عملي لاستخدام الثوريوم كان بواسطة كارل أور فون ولسباتش (Carl Auer von Welsbach)، الذي لاحظ أن القماش عندما يغمس في محلول من نترات الثوريوم يحوي ١ ٪ من نترات السيريوم فإنه يعطي ضوءاً أبيضاً براقاً إذا سخن في لهب. وبناءً على هذه الملاحظة فقد بدأ عام ١٨٩١ م في إنتاج فتائل الغاز التي سوقت في حينها ولاقت رواجاً، وماتزال تستخدم في كثير من دول العالم بما فيها الهند. ولقد أدى اكتشاف فتائل الغاز إلى زيادة الطلب على الثوريوم. وفي وقت قصير فقد تم استخلاص الثوريت (سيليكات الثوريوم) والمونازيت (فوسفات السيزيوم والثوريوم واللانثانيوم) من رمال شواطئ البرازيل لغرض إنتاج الثوريوم.

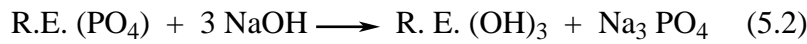
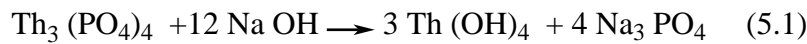
وفي عام ١٩٠٩ م كان الجيولوجي الألماني شومبيرج (Schomberg) يدرس أنواعاً من رمال الشواطئ لاستخدامها كمصدر للمونازيت، فلاحظ أن ليف جوز الهند المستخدم لإنتاج الأقمشة، الموجود في أحد مستودعات هامبرج يحوي

رمالاً ثقيلة. وقد عرف أن هذا الليف مستورد من الهند من منطقة موهافالاكورشي (Mahavalakuric) في تارافانكور (Tarvancore). وقد وجد أن ذلك الرمل يحوي نسبة ١٪ من المونازيت. بدأ هذا الرجل بنقل هذه الرمال بهدوء من ذلك الشاطئ إلى ألمانيا حيث كان يضعها في السفن المتوجهة إلى ألمانيا كصابورة (ثقل يوضع في السفن لحفظ توازنها). ومن ثم يقوم باستخلاص الثوريوم من تلك الرمال. بعد ذلك قدم شومبيرج إلى الهند واستقر فيها وتزوج فتاة هندية. ثم بدأ يفصل المونازيت من الرمل ثم يقوم بتصديره لألمانيا لاستخلاص الثوريوم منه وأصبحت ألمانيا من المراكز الرئيسية لصناعة فتائل الغاز في ذلك العصر. وخلال الحرب العالمية الأولى، استولى البريطانيون على المصنع الموجود في موهافالاكورشي. وقد أدى اكتشاف المصابيح الكهربائية إلى انخفاض الطلب على الثوريوم ولكن أصبحت رمال الشاطئ مهمة لاستخلاص الألمنيوم (Ilmenite) وهو معدن من أكاسيد الحديد والتيتانيوم يستخدم لتحضير الدهان الأبيض. وفي الوقت الحاضر تستخدم رمال الشاطئ لاستخلاص العناصر الأرضية النادرة (rare earth elements). بعد ذلك انتقلت ملكية الشركة البريطانية إلى حكومة الهند بعد استقلال الهند وأنشئت شركة الهند للعناصر النادرة ((Indian Rare Earths (IRE) في أغسطس عام ١٩٥٠ م. وجد المونازيت بعد ذلك في عدد من الشواطئ في كرناتاكا (Karnataka) وتاميل نادو (Tamil Nadu) وأوريسا (Orissa). ويقدر الاحتياطي من الثوريوم في تلك الرمال بحوالي ٣٦٣ ٠٠٠ طن وهو ما يمثل ٣٠٪ من احتياطي العالم من هذا العنصر. في الوقت الحاضر تقوم شركتان هما شركة الهند للعناصر النادرة (IRE) وشركة كيرالا للمعادن والفلزات (Kerala Minerals and Metals) بالاستفادة من رمال الشواطئ. وقد أنشئت معامل في موهافالاكورشي وشافارا (Chavara) في إقليم كيرالا (Kerala)، وكذلك في شاترابور (Chatrapur) في إقليم أوريسا. وفي الوقت الحاضر فإن الطلب على الثوريوم قليل حيث أن طلبه الرئيس هو استخدامه في أسلاك التوهج المصنوعة

من التنجستين. وكذلك استخدامه في قطب اللحام المصنوع من التنجستين وفي بعض سبائك المغنيسيوم الخاصة ومعظم العمل القائم على المونازيت هو لاستخلاص العناصر الأرضية النادرة حيث يستخلص الثوريوم كمنتج ثانوي.

استخلاص الثوريوم Recovery of Thorium

يعتبر الألمنيوم ذو التركيب الكيميائي FeTiO_3 أحد المكونات الرئيسة لرمال الشاطئ حيث يشكل ما نسبته ٦٥-٨٠٪. أما المونازيت فيشكل فقط ٠,٥-١٪. والمعادن الأخرى المفيدة في رمال الشواطئ هي الزركون (Zircon) والروتايل Rutile (ثاني أكسيد التيتانيوم) والجرانت (Granet) والسلمانايت (Silimanite). ولفصل هذه المعادن من رمال الشواطئ فإنه يتم استخدام طرق الفصل الفيزيائي المغناطيسي والوزني. ويستخلص الثوريوم من الجزيء المحتوي على المونازيت. والمونازيت هو عبارة عن معقد من فوسفات بعض المعادن حيث يحوي هذا المعقد فوسفات الثوريوم والعناصر الأرضية النادرة. ويحوي تقريباً ٩٪ من ثاني أكسيد الثوريوم ThO_2 و ٦٠٪ من أكاسيد العناصر الأرضية النادرة و ٠,٤٪ من ثاني أكسيد اليورانيوم و ٢٧٪ من خماسي أكسيد الفسفور. وعند معاملته بهيدروكسيد الصوديوم المركز تنتج فوسفات الصوديوم وهيدروكسيدات الثوريوم واليورانيوم والعناصر الأرضية النادرة وفق المعادلة:



وفوسفات الصوديوم ذوابة في الماء ويمكن الحصول عليها من المحلول، وتستخدم في صناعة النسيج حيث أنها مزيله لعسر الماء. أما الراسب المتبقي وهو ما يعرف بأنه مركز الثوريوم فإنه يذاب في حمض الهيدروكلوريك، ومن ثم يترسب معظم الثوريوم ككبريتات باستخدام ٥٠٪ حمض الكبريتيك،

ويعامل المحلول بعد ذلك بفلوريد الصوديوم وحمض الهيدروفلوريك للحصول على ماتبقى من الثوريوم واليورانيوم والعناصر الأرضية النادرة. ويتم تحويل كبريتات الثوريوم إلى هيدروكسيد الثوريوم بمعاملة بهيدروكسيد الصوديوم، ثم بعد ذلك يذاب في حمض الهيدروكلوريك ويعاد ترسيبه ككبريتات ثوريوم وذلك لتحسين نقاوته. بعد ذلك تحول كبريتات الثوريوم إلى هيدروكربونات بمعاملتها بكاربونات الأمونيوم ثم تذاب في حمض النيتريك، وبعدها يبخر المحلول للحصول على بلورات نترات الثوريوم.

ونترات الثوريوم التي يتم الحصول عليها بالطريقة الآتية الذكر تعرف تجارياً بدرجة الفتائل (أي أن هذا الثوريوم يكون جاهزاً للاستخدام في صناعة الفتائل). ولكي يستخدم الثوريوم في المفاعلات النووية فإنه يستلزم أن يكون ذا نقاوة عالية، ويجب أن يكون تركيز كثير من الشوائب خصوصاً البورون والعناصر الأرضية النادرة أقل من عدد قليل من أجزاء من المليون. ولتنقية نترات الثوريوم من درجة الفتائل فإن ذلك يتم بالاستخلاص بالمذيبات، حيث تستخدم فوسفات ثلاثي البيوتيل (TBP). وهناك أيضاً طريقة مطورة للاستخلاص المباشر للثوريوم واليورانيوم من الثوريوم المركّز الناتج بعد المعاملة بهيدروكسيد الصوديوم (كما في المعادلة بين 5.1 و 5.2)، حيث يتم غسل الثوريوم المركّز بمحلول مخفف من هيدروكسيد الصوديوم، ثم يذاب المركز في حمض النيتريك للحصول على محلول يحوي نترات الثوريوم واليورانيوم والعناصر الأرضية النادرة. ويفصل اليورانيوم من هذا المحلول باستخلاصه بمذيب عضوي انتقائي لليورانيوم مكون من ٥ ٪ إلى ١٠ ٪ ثلاثي بيوتيل الفوسفات في الكيروسين (Kerosene) وفي المرحلة الثانية يستخلص الثوريوم في ٤٠ ٪ من فوسفات ثلاثي البيوتيل (TBP) في الكيروسين ويعاد استخلاص الثوريوم واليورانيوم، كل على حده، في محلول مائي على شكل نترات، تنقى باستخلاصها عدة مرات. بعد ذلك، تتركز النترات للحصول على نترات اليورانيوم ونترات الثوريوم.

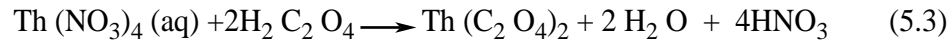
الثوريوم ومركباته Thorium and its Compounds

فلز الثوريوم Thorium Metal

أحد الطرق الرئيسية لإنتاج الثوريوم هي اختزال رباعي فلوريد الثوريوم بواسطة الكالسيوم. ولا يمكن تطبيق الطريقة المستخدمة في حالة اليورانسيوم والبلوتونيوم على الثوريوم مباشرة لأن فلز الثوريوم له درجة انصهار تبلغ ١٧٥٠ درجة مئوية، وهي درجة حرارة عالية إذا أريد تشكيل الفلز كقالب أثناء عملية الاختزال. ولحل هذه المشكلة يضاف كلوريد الخارصين إلى فلوريد الثوريوم. ولذا، فإنه بعد عملية الاختزال تنتج سبيكة من الثوريوم والخارصين تحوي على ٢٠٪ خارصين، درجة انصهارها ١٣٦٠ درجة مئوية. ويمكن تشكيل السبيكة في قالب خاص. أما الخارصين فإنه يتم إزالته من الثوريوم في خطوة لاحقة، وذلك بإجراء عملية تقطير تحت التفريغ عند درجة حرارة ١١٥٠ درجة مئوية. بعد ذلك يذاب فلز الثوريوم بالتسخين ويسبك على هيئة قضبان. و فلز الثوريوم فلز أبيض فضي لكنه يفقد بريقه بسرعة عند تعرضه للهواء. وكثافة الثوريوم ١١,٧ جرام/سم^٣، وعند تسخينه بمعزل عن الهواء فإن تركيبه البلوري من نوع ألفا يتحول إلى نوع بيتا عند درجة حرارة أعلى من ١٣٥٠ درجة مئوية وينصهر عند درجة حرارة ١٧٥٠ درجة مئوية.

أكسيد الثوريوم Thorium Oxide (ThO₂)

يمكن إنتاج أكسيد الثوريوم المناسب لإنتاج أقراص الثوريوم المستخدمة كوقود في المفاعلات بترسيب الثوريوم كأكسالات Oxalate من محلول نيتريت الثوريوم، وفقا للمعادلة :



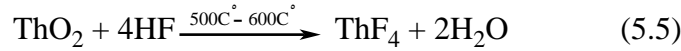
بعد ذلك يرشح راسب الأكسالات ويغسل ثم يحرق في وجود الأكسجين للحصول على أكسيد الثوريوم، وفقا للمعادلة :



وأكسيد الثوريوم صلب أبيض اللون كثافته ١٠,٠ جرام / سم^٣. وهو ثابت جداً ويمكن تسخينه إلى درجة قريبة من درجة انصهاره (٣٣٧٠ درجة مئوية) دون أن يتلف. وله ملاءمة كبيرة مع مواد التغليف. وهو ثابت إلى حد ما في ظروف التشعيع النيوتروني ويكون محلولاً متصلياً مع أكاسيد المواد الانشطارية مثل UO_2 و Pu O_2 .

رباعي فلوريد الثوريوم (ThF_4) Thorium Fluoride

يتكون رباعي فلوريد الثوريوم خلال إنتاج فلز الثوريوم بتفاعل أكسيد الثوريوم مع فلوريد الهيدروجين وفقاً للمعادلة:



ورباعي فلوريد الثوريوم مادة صلبة بيضاء كثافتها ٦,١٢ جرام / سم^٣ ودرجة انصهارها ١١١٠ درجة مئوية.

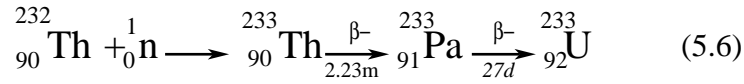
كربيد الثوريوم Thorium Carbide

يكون الثوريوم نوعين من الكربيدات هما أحادي كربيد الثوريوم (ThC) وثنائي كربيد الثوريوم (ThC_2). ويمكن تحضيرهما بتفاعل فلز الثوريوم مع الكربون أو الميثان أو بتفاعل أكسيد الثوريوم ThO_2 مع الكربون عند درجة حرارة ١٥٠٠ درجة مئوية. وتبلغ كثافة ثاني كربيد الثوريوم ٨,٧٦ جرام / سم^٣، ودرجة انصهاره ٢٦٤٠ درجة مئوية. ويستخدم كربيد الثوريوم كمادة خصبة في المفاعلات ذات الحرارة العالية المبردة بالغاز، وكذلك يخلط مع ثنائي كربيد اليورانيوم لعمل وقود للمفاعلات ذات الحرارة العالية المبردة بالغاز. High temperature gas cooled reactors.

دورة وقود الثوريوم وتوالده

Thorium Breeders and Thorium Fuel Cycle

الثوريوم مادة خصبة لإنتاج اليورانيوم - ٢٣٣ (U²³³) ويمكن عمل هذا بمصدر نيوتروني كبير مثل المفاعل النووي. ففي مفاعل سيرس CIRUS توضع مواد خاصة تحوي أكسيد الثوريوم ThO₂ على شكل أقراص بشكل منتظم حول لب المفاعل لإنتاج اليورانيوم ٢٣٣ وفقاً للتفاعل النووي :



كما يمكن وضع أكسيد الثوريوم ThO₂ في أوعية حول لب مفاعل كلبكام وهو مفاعل ولود سريع تجريبي، وذلك لإنتاج اليورانيوم ٢٣٣. وهذه التجارب مفيدة في تطوير تقنية تجهيز وقود الثوريوم، وفي عملية إعادة معالجة وقود الثوريوم، وفي فهم فيزياء المفاعل بنظام اليورانيوم ٢٣٣ والثوريوم ٢٣٢ التي تعتبر حيوية لبرنامج الهند للاستفادة من الثوريوم. وقد تم تشغيل مفاعل تجريبي صغير (بورنينا II) PURNIMA II في ترومبي Trombay يستخدم اليورانيوم ٢٣٣ كوقود إضافة إلى مفاعل تجريبي آخر (كاميني) KAMINI تم تشغيله أيضاً في كلبكام. وفي بعض مفاعلات الماء الثقيل المضغوط PHWR فإن بعض حزم الوقود التي تحوي حبيبات ثاني أكسيد الثوريوم بدلاً من ثاني أكسيد اليورانيوم تستخدم في المراحل الأولى لتشغيل هذا المفاعل، بغرض مساواة الفيض النيوتروني. وسوف يكون هذا أحد المصادر الجيدة لليورانيوم ٢٣٣.

وفي دورة وقود الثوريوم يستخدم اليورانيوم ٢٣٣ كمادة انشطارية، والثوريوم ٢٣٢ كمادة خصبة، ومن الممكن أن يجهز مفاعل يكون ولوداً أو قريباً من الولود باستخدام هذا النظام. وفيما يلي بعض أبرز أنماط المفاعلات

المخصصة لهذا الغرض:

١- المفاعلات الولودة السريعة (Fast reactors).

٢- مفاعلات الماء الثقيل المضغوط المعتمدة على الثوريوم
(Thorium based pressurised heavy water reactors).

٣- مفاعلات الماء الثقيل المتطورة (Advanced heavy water reactor).

٤- مفاعلات الماء الخفيف الولودة (Light water breeder reactors).

وقد تم الحصول على نسبة توليد أكبر من الواحد الصحيح في المفاعلات السريعة فقط. ولكن النتيجة كانت أقل بكثير من دورة وقود البلوتونيوم. أما النمطان الثاني والثالث فيمكن أن يعطيا نسبة توليد قريبة من الواحد الصحيح، وهذا يعني أن كمية اليورانيوم 233 المنتجة تكفي فقط لجعل المفاعل يعمل (أي أن ما سينتج من اليورانيوم 233 سوف يستهلك في المفاعل نفسه كوقود)، وهذا يعني أن توسيع القدرة النووية غير ممكن دون إمدادات خارجية من المواد الانشطارية. ومن أنماط المفاعلات الأخرى التي تعتمد على الثوريوم إلا أنها غير ولودة هو المفاعل عالي الحرارة المبرد بالغاز (High Temperature Gas Cooled Reactor).

إن إنتاج نظيري البروتاكتينيوم 233 (Pa) واليورانيوم 233 (U) نتيجة لتشعيع الثوريوم بالنيوترونات يجعل دورة وقود الثوريوم أكثر تعقيداً مقارنة بدورة وقود البلوتونيوم. وينتج البروتاكتينيوم 233 كناتج وسطي أثناء إنتاج اليورانيوم 233 من الثوريوم 232 . وله عمر نصف طويل نسبياً يبلغ ٢٧ يوماً، وله مقطع عرضي كبير لامتصاص النيوترونات الحرارية. ولهذا سيكون هناك فقد للبروتاكتينيوم 233 وللنيوترونات ينتج عنه نسبة توليد منخفضة. وتحل هذه المشكلة باستخدام نمط من المفاعلات يعرف بمفاعلات الملح المنصهر (molten salt reactors)، حيث يكون الوقود عبارة عن خليط منصهر يمكن أن يمرر في معمل تنقية لفصل البروتاكتينيوم 233 وإزالة نواتج الانشطار. أما

اليورانيوم ٢٣٣ فإنه ينتج بكميات قليلة بسبب التفاعلات الجانبية. ويزال اليورانيوم ٢٣٣ أثناء إعادة معالجة وقود الثوريوم. ويحوي الوقود المعالج عدداً من الأجزاء في المليون (ppm) من اليورانيوم ٢٣٢. وتتضمن السلسلة الإشعاعية لليورانيوم ٢٣٢ عدداً من النظائر ذوات أعمار نصف قصيرة تنبعث منها إشعاعات جاما ذات قدرة الاختراق العالية (أنظر جدول ١-٥). لذلك، فإن التعامل مع اليورانيوم ٢٣٣ يجب أن يكون عن طريق التحكم عن بعد. ومن نواتج انشطار الثوريوم ٢٣٢ نظير الثوريوم ٢٢٨ وهو ينتج من تفكك اليورانيوم ٢٣٢. ولا يمكن التعامل معه بنفس أسلوب التعامل مع الثوريوم الطبيعي، ويجب تركه لمدة لا تقل عن ١٠-١٢ سنة بعد إنتاجه نظراً للنشاطية الإشعاعية العالية من نواتج تفكك ألفا وجاما عالية الطاقة (أنظر جدول ١-٥). وهذه العوامل بالإضافة إلى نسبة التوليد المنخفضة للثوريوم قللت من التركيز على تطوير استخدام الثوريوم كوقود نووي في الوقت الحاضر.

النظير	نمط التفكك	عمر النصف	طاقة جاما الغالبة
²³² U	α	72 y	طاقة منخفضة
²²⁸ Th	α	1.9 y	طاقة منخفضة
²²⁴ Ra	α	3.6 d	0.24 MeV
²²⁰ Rn	α	55 sec	0.54 MeV
²¹⁶ Pu	α	0.15 sec	لا يوجد
²¹² Pb	β	10.6 hr	0.3 MeV
²¹² Bi	α	60 min	0.78 MeV
²⁰⁸ Ti	β	3 min	26 MeV
²⁰⁸ Pb	—	مستقر	-

جدول (٥ - ١): نواتج تفكك الثوريوم ٢٢٨ و اليورانيوم ٢٣٢ .

مولدات الثوريوم *Thorium Breeders and Fuels*

تتشابه المفاعلات الولودة السريعة المستخدمة للثوريوم تماماً مع المفاعلات المستخدمة للبلوتونيوم فيما عدا أن الوقود فيها يحوي اليورانيوم ٢٣٣ بدلاً من البلوتونيوم ٢٣٩ ، والثوريوم ٢٣٢ بدلاً من اليورانيوم ٢٣٨ . ويمكن استخدام الأكسيد أو الكاربيد أو الفلز كوقود في هذه الحالة. وليس هناك جهود بحثية في الوقت الحالي لتطوير الثوريوم كوقود للمفاعلات الولودة السريعة. إن مفاعلات الماء الخفيف الولودة هي مفاعلات ماء مضغوط مع تغييرات كبيرة في تصميم الوقود ونظام التحكم. ولغرض تحسين الاستفادة من النيوترونات اقتصادياً فإنه يستخدم الثوريوم لامتصاص النيوترونات الذي ينتج عنه تكون اليورانيوم ٢٣٣. والوقود المكون من خليط أكسيد الثوريوم واليورانيوم له تصميم خاص حيث توجد نسبة عالية من ثاني أكسيد اليورانيوم في وسط الوقود، ويسمى هذا الجزء النواة. أما الغطاء الخارجي من الوقود فنسبة ثاني أكسيد اليورانيوم فيه منخفضة. وبمثل هذه التحسينات يمكن أن تكون نسبة التوليد في هذا النمط مقاربة للواحد.

أما مفاعلات الماء الثقيل المضغوط المعتمدة على الثوريوم فهي مشابهة للنظام التقليدي وتستخدم ثاني أكسيد اليورانيوم والثوريوم كوقود. ومن المتوقع أن يكون هذا النمط أكثر اقتصاداً للنيوترونات ويتميز بنسبة توليد تقترب من الواحد إذا أبقى على احتراق الوقود منخفضاً.

وللاستفادة من الثوريوم أنشأت الهند مفاعل ماء ثقيل متطور (AHWR) (Advanced Heavy Water Reactor). وهذا المفاعل صمم على طراز أنبوبي (tube type reactor) ، وتكون الأنابيب عمودية الوضع بحيث تحوي الوقود وتفصل المهدئ والمبرد. وقد استخدم الماء الثقيل كمهدئ، والماء الخفيف الذي يصل لدرجة الغليان كمبرد. ويستخدم خليط من أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم أو أكسيد البلوتونيوم والثوريوم كوقود رئيس محاطاً بأكسيد

الثوريوم. وقد صمم المفاعل بحيث يكون ٧٥ ٪ من الطاقة ناتجا من اليورانيوم ٢٣٣ المتولد في حزم أكسيد الثوريوم. وعليه فإن استهلاك البلوتونيوم لا يذكر. بالإضافة إلى ذلك فإن المفاعل له مزايا أمان متقدمة.

والنمط الوحيد الذي يعطي أداء توليد جيد مع الثوريوم هو مفاعل الملح المنصهر. وهناك مفاعل نموذجي من هذا النوع بقدرة ٨ ميغا واط حرارة تم تشغيله في مختبر أوكرج الوطني بأمريكا في الفترة من يونيو ١٩٦٥م حتى ديسمبر ١٩٦٩م. وقد طور تصميم هذا المفاعل حيث الوقود عبارة عن ملح منصهر في وعاء كبير. ويحوي الملح فلوريدات الليثيوم والبريليوم والثوريوم واليورانيوم. واستخدمت أعمدة الجرافيت كمهدئ حيث تم تعليقها في الملح المنصهر. أما المبرد فإنه لا يمر من خلال المفاعل وإنما بدلاً من ذلك يؤخذ جزء من الوقود الساخن إلى خارج لب المفاعل في مبادل حراري للتبريد، ثم بعد ذلك يعاد إلى المفاعل. ويمرر جزء آخر من الوقود المنصهر على نظام تنقية لفصل البروتاكتينيوم ٢٣٣ والتخلص من نواتج الانشطار. وهذا النمط من المفاعلات يمكن أن يعطي نسبة توليد ١,٥٠ حيث أن متطلبات الوقود لكل ميغا واط كهرباء تكون أقل منها في المفاعلات الولودة السريعة بحوالي ٢-٣ مرة، ويقارن أداء هذه المفاعلات بمفاعلات البلوتونيوم الولودة السريعة.

وقد طور نوع آخر من المفاعلات للاستفادة من الثوريوم، يدعى المفاعل العالي الحرارة المبرد بالغاز (High Temperature Gas Cooled Reactor) (HTGR).. وقد حظي هذا النمط باهتمام متجدد نظراً لبعض مزايا الأمان الأساسية فيه. ونسبة التحويل التي يمكن الحصول عليها في هذا المفاعل هي من ٠,٨٥ إلى ٠,٩ وعند استخدام وقود اليورانيوم ٢٣٣ تعتمد هذه المفاعلات على تصميم مختلف تماماً للوقود، حيث لا يستخدم التغليف الفلزي لوجود خطورة من تسرب نواتج الانشطار المشعة في حالة حدوث فشل بسبب تسرب المبرد. وفي المفاعل العالي الحرارة المبرد بالغاز (HTGR) يستبدل كربون وكربيد

السيليكون بالغلاف الفلزي الذي يتميز بدرجة انصهار عالية. وحيث أن الأحجام العادية من الأنابيب المصنعة من الكربون أو كربيد السيليكون ليس لها المتانة الكافية لتستخدم كأنابيب تغليف فإنه يستعاض عن ذلك بتغطية كريات الوقود الصغيرة بطبقات من الكربون وكربيد السيليكون تدريجياً. فالوقود إما أن يكون ثاني أكسيد اليورانيوم والثوريوم وإما ثاني كربيد اليورانيوم والثوريوم، على شكل كريات صغيرة جداً بقطر ٠,٢ ملم تقريباً (أقل من حبات بذور الخردل) وتغطي بثلاث طبقات من الكربون وكربيد السيليكون ثم الكربون بطريقة كيميائية تعرف بالترسيب البخاري (Vapour deposition). وتتميز هذه الحبيبات بخواص الوقود نفسها، وبمقدرة خاصة على تحمل درجات الحرارة العالية. وحيث أن المفاعل يتطلب شكلاً هندسياً ثابتاً وممرات للمبرد وممرات لادخال أعمدة التحكم، لذا فإن الوقود المحضر بالطريقة الآنفة الذكر يخلط مع قار عالي النقاوة ويشكل في أعمدة أو على شكل كريات ثم يحمص عند درجة حرارة عالية للحصول على متانة ميكانيكية كافية. وتستخدم قوالب من الجرافيت ذات فتحات اسطوانية أو كريات من الجرافيت كمهدئ حسب شكل الوقود المستخدم. كما يستخدم غاز الهليوم كمبرد حيث تبلغ درجة حرارته عند الدخول ٢٥٠ درجة مئوية وعند الخروج ٧٥٠ درجة مئوية.

إعادة معالجة وقود الثوريوم Thorium Fuel Reprocessing

في دورة وقود الثوريوم يعالج الوقود المشع كي يتم فصل المادة الانشطارية وهي اليورانيوم ٢٣٣ وما تبقى من الثوريوم ٢٣٢. وتشبه عملية معالجة الثوريوم (Thorex) عملية معالجة البلوتونيوم (Purex). ويتم فيها فصل اليورانيوم ٢٣٣ والثوريوم ٢٣٢ بالاستخلاص بالمذيب العضوي فوسفات ثلاثي البيوتيل (TBP). إلا أن هناك بعض الاختلافات عن معالجة البلوتونيوم، نظراً لأنه في حالة الثوريوم فإن فترة التبريد لا بد أن تكون أطول لإعطاء الفرصة للبروتاككتينيوم ٢٣٣ (^{233}Pa) ليتفكك إلى يورانيوم ٢٣٣. ويتم التبريد