الوقود النووي

أ. د. محمد فاروق أحمد

يعد الوقود النووي أغنى أنواع الوقود بالطاقة، فالطاقة الحراريه المتولدة عن انشطار جرام واحد من الوقود الانشطاري أو القابل للانشطار تبلغ ٨٢ ألف مليون جول، وهذا يكافىء كمية الطاقة المتولدة عن ٢,٧٧ طن من الفحم الحجري الجيد ، كما تعادل الطاقة المتولدة عن تفجير عشرين طن من مادة (تي إن تي) شديدة الانفجار. ينبغي الإشارة إلى أن كفاءة تحويل تلك الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية ـ في الوقت الحالي ـ تبلغ ٣٣٪، بالنسبة لغالبية المفاعلات النووية المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية، وقد تصل إلى حوالي ٤٠٪ في قليل من هذه المفاعلات.

يتضح من ذلك أن جرام واحد من المواد الانشطارية أو القابلة للانشطار يولد طاقة كهربائية مقدارها ٢٧ ألف مليون جول. والتي تكفي لتشغيل مصباح كهربائي قدرته ٦٠ واط فترة تزيد على ١٤ سنة بشكل متواصل (أي ليلاً ونهاراً).

من جانب أخر تبلغ الطاقة المتولدة عن اندماج ذرات جرام واحد في خليط مكون من النظيرين الثاني (الديتريوم٢) والثالث (التريتيوم٣) للهيدروجين ، بنسب وزنية مقدارها حوالي ٤٠ ٪ و٦٠ ٪ على التوالي ٣٢٩ ألف مليون جول، أي ما يزيد على أربعة أضعاف الطاقة المتولدة من انشطار جرام واحد من مادة انشطارية. ويعود السبب في ذلك إلى طبيعة القوى النووية الفائقة، التي تربط الذرات ببعضها البعض مقارنة بالقوى الكهربائية الواهية نسبياً.

أنواع الوقود النووي

يندرج الوقود النووي تحت نوعين رئيسيين هما، الوقود الانشطاري أو القابل للانشطار الذي يستخدم كمصدر للطاقة في التطبيقات العلمية والعسكرية، والوقود الاندماجي الذي لايستخدم إلا في الأغراض العسكرية التدميرية .

● الوقود الانشطاري

الوقود الانشطاري هو وقود مصنوع من المواد التي يطلق عليها اسم المواد الانشطارية، ومنها اليورانيوم ٢٣٥، والبلوتونيوم ٢٣٩، ومواد قابلة للانشطار مثل اليورانيوم ٢٣٨.

يطلق مصطلح المواد الانشطارية على النظائر التي تنشطر نواتها بفعل أي من النيوترونات الحرارية أو النيوترونات البطيئة، ويقصد بالنيوترونات الحرارية: تلك النيوترونات التي تبلغ طاقتها ٠,٠٢٥ إلكترون فولط، وتبلغ سرعتها حوالي ٢٠٠٠م/ث ، و تقابل سرعات الجسيمات النووية بتأثير الحركة الحرارية العشوائية، أما النيوترونات البطيئة فهي نيوترونات ذات طاقة أعلى نسبياً (حوالي واحد إلكترون فولت) ، وتبلغ سرعتها ١٠٠٠٠م/ث تقريباً.

أما المواد القابلة للانشطار فهي النظائر التي تنشطر نواتها بالنيترونات السريعة، ولايحدث ذلك إلا إذا زادت طاقة النيوترون الممتص على ١,٨ ميقا إلكترون فولط .

ينقسم الوقود الانشطاري إلى وقود طبيعي ووقود مصنع :

* **الوقود الطبيعي:** وهو عبارة عن اليورانيوم بنظائره الثلاث: يورانيوم ٢٣٨ و٢٣٥ و٢٣٤ (U238وU235وU234)، ويوجد في القشرة الأرضية بنسبة تركيز متوسطة، تبلغ حوالي ١,٨ جم لكل طن من التربة. وتتفاوت هذه النسبة تفاوتاً هائلاً من مكان لآخر. وفي الوقت الحالي، تعد الأماكن التي يتراوح فيها تركيز عنصر اليورانيوم في التربة بين ٠,٠٣ ٪ ٠,٥٪ مناجم ملائمة لاستخراج اليورانيوم، مع اختلاف تكاليف استخلاص الكيلوجرام الواحد من هذه المناجم تفاوتاً كبيراً وفقاً للتركيز. وتوجد معادن اليورانيوم في القشرة الأرضية، بصورة أساسية، في صورة ثاني أكسيد اليورانيوم($U0_2$) ، وفي أحيان نادرة جداً في صورة أكسيد ثلاثي اليورانيوم ثماني الأكسجين (U_30_8). كذلك توجد كميات من اليورانيوم في مياه البحار، بتركيز ٠,٠٠٣ جزء في المليون، بينما يبلغ هذا التركيز في الطين الموجود في قيعان البحار حوالي١ جزء في المليون. ومن واقع هذه التراكيز تقدر كمية اليورانيوم الطبيعي الموجودة في مياه البحار والمحيطات بحوالي ٤٠٠٠ مليون طن. وفي الوقت الحالي يستخدم أكسيد

التيتانيوم الهيدروجيني (HTO) لامتصاص اليورانيوم من ماء البحر، ثم يستخدم بعد ذلك محلول كربونات الأمونيوم ($NH_4CO_3 \cdot H_2O$) لفصل اليورانيوم.

تبلغ نسب النظائر الثلاثة في اليورانيوم الطبيعي حوالي ٩٩,٢٧٥ ٪ لليورانيوم٢٣٨، وحوالي ٠,٧٢ ٪ لليورانيوم٢٣٥، وحوالي ٠,٠٠٥ ٪ لليورانيوم٢٣٤، وتعني هذه النسب أن اليورانيوم٢٣٥ يوجد في الطبيعة مختلطاً باليورانيوم٢٣٨، بواقع ٧,٢ كجم من اليورانيوم٢٣٥ لكل طن من اليورانيوم الطبيعي المستخرج من أي مصدر من مصادره الطبيعية (الأرض أو الماء).

ولايستخدم الخليط الطبيعي لعنصر اليورانيوم كمصدر للطاقة النووية إلا في عدد قليل من مفاعلات القدرة النووية، كما لايستخدم هذا الخليط للأغرض العسكرية سوى في الطور الثالث من الرؤوس النووية ثلاثية الطور.

أما الوقود المستخدم لتوليد الطاقة في غالبية مفاعلات القدرة النووية، فهو وقود من اليورانيوم الطبيعي سالف الذكر، مثرًّى بمادة انشطارية كاليورانيوم٢٣٥ أو البلوتونيوم٢٣٩، حيث تتراوح نسبة الإثراء، بأي من هذين النظيرين الانشطاريين، بين ٢٪ و١٥٪ من الوزن الإجمالي لعنصر اليورانيوم في لب المفاعل، تبعاً لنوع المفاعل.

وتعود الحاجة إلى إثراء الوقود بالمادة الانشطارية إلى أن ما يعرف بالمقطع العرضي لانشطار اليورانيوم٢٣٥ أو البلوتونيوم٢٣٩ بالنيوترونات الحرارية الذي يزيد بمئات المرات عن المقطع العرضي لانشطار اليورانيوم ٢٣٨ . ويقصد بالمقطع العرضي للانشطار احتمال حدوث الانشطار عند سقوط نيوترون واحد على هدف مساحته ١ سم^2 يتضمن ذرة واحدة انشطارية أو قابلة للانشطار. ويبين جدول (١)، قيم بعض المقاطع العرضية للانشطار أو للامتصاص (دون انشطار) بوحدة بارن (تساوي ١×١٠$^{-٢٤}$ سم٢)، كما بين الجدول متوسط عدد النيوترونات المتولدة عن انشطار واحد لبعض النظائر الانشطارية والقابلة للانشطار.

البيان	يوروانيوم ٢٣٥	بلوتونيوم٢٣٩	يورانيوم ٢٣٨
مقطع عرضي للانشطار	٥٨٥	٧٣٠	–
مقطع عرضي للامتصاص	١٠٨	٣٠٣	٢,٨
عدد نيوترونات الانشطار	٢,٤٥	٢,٨٥	–

● جدول (١) قيم المقاطع العرضية لانشطار بعض النظائر.

يتم الحصول على اليورانيوم٢٣٥ اللازم للإثراء بفصله عن اليورانيوم الطبيعي باستخدام عدد من الطرق الفيزيائية المعقدة والطويلة والمكلفة، نظراً لاستحالة فصله بالطرق الكيميائية، مثل: طريقة الانتشار الغازي، وطريقة الطرد المركزي، وطريقة الدوامات، وطريقة الفصل باستخدام مصادر ليزر خاصة، وطريقة التوازن الطوري القائمة على الاختلافات الطفيفة في درجة التطاير بين مركب سادس فلوريد اليورانيوم للنظيرين.

وتجدر الإشارة إلى أن أفضل طرق الفصل في الوقت الحاضر غير قادرة على فصل كامل كمية اليورانيوم٢٣٥ من الخليط الطبيعي لهذا العنصر، وإنما يمكن فصل ما لا يزيد على حوالي ٤,٥ كجم من اليورانيوم ٢٣٥ من كل طن من عنصر اليورانيوم الطبيعي، ويسمى اليورانيوم المتبقي عن الفصل باليورانيوم المستنفد (المنضب) الذي لا يحتوي الطن منه إلا على حوالي ٣ كجم من اليورانيوم٢٣٥ .

وهكذا، يتضح أن كل طن من وقود المفاعلات النووية الذي تبلغ فيه نسبة الإثراء ٣٪ يتضمن ٣٠ كجم من اليورانيوم٢٣٥، ونسبة إلى أن كل طن من اليورانيوم الطبيعي يحوي ٧,٢ كجم من اليورانيوم ٢٣٥ فإنه يلزم إضافة ٢٢,٨ كجم يورانيوم٢٣٥ . تؤخذ من كمية تتراوح بين حوالي ٥ ـ ٧ طن من اليورانيوم الطبيعي، تبعاً لطريقة الإثراء المستخدمة، فتصبح هذه الكمية الأخيرة يورانيوم مستنفد (منضب).

أما في الوقود النووي المستخدم في صناعة الأسلحة النووية الانشطارية أحادية الطور، فإنه يستخدم وقود غني الإثراء، تصل فيه نسبة اليورانيوم٢٣٥ أو البلوتونيوم٢٣٩ إلى حوالي ٩٠ ٪ من إجمالي عنصر اليورانيوم، وذلك لخفض مقدار الكتلة الحرجة اللازمة للتفجير الذاتي للسلاح، ولزيادة كفاءة استغلال الطاقة في التفجير.

*** الوقود المصنع:** ويتمثل في تحويل اليورانيوم وفق عدة تفاعلات من خلال المفاعلات النوويه الى البلوتونيوم ٢٣٩ والذي يتميز بأن المقطع العرضي لانشطاره (أي احتمال انشطاره) بالنيوترونات الحرارية يزيد بحوالي ٢٤٪ عن مثيله اليورانيوم٢٣٥، ولذلك يمكن استخدام وقود مثرى بالبلوتونيوم٢٣٩ بنسبة إثراء أقل لإنتاج نفس الطاقة، كما يمكِّن هذا الأمر من خفض مقدار الكتلة الحرجة للطور الانشطاري من السلاح النووي.

يمكن الحصول على البلوتونيوم٢٣٩، كمنتج جانبي داخل المفاعلات النووية عن طريق اقتراب نيوترون حراري أو بطيء أو حتى نيوترون بطاقة بينية (أي بطاقة أعلى من طاقة النيوترونات البطيئة ولكنها أقل من حد الطاقة اللازمة للانشطار، وهو حوالي ١,٨ م إ ف) من نواة ذرة اليورانيوم٢٣٨ـ الذي لاينشطر بالنيوترونات الحرارية البطيئة ـ فإنه قد يمتص هذا النيوترون في هذه النواة، فتتحول إلى نواة اليورانيوم ٢٣٩ التي تتفكك تلقائياً لنشاطها الإشعاعي، بعمر نصفي يبلغ ٢٣,٥دقيقة من خلال تفكك بيتا (β)، لتتحول إلى نواة النبتونيوم٢٣٩ بعمر نصفي ٢,٣٥ يوماً، والتي يتكون منها البلوتونيوم٢٣٩ (العنصر رقم ٩٤ في الجدول الدوري للعناصر). من خلال تفكك بيتا، وبذلك ينتج البلوتونيوم٢٣٩

اصطناعياً، بصورة تلقائية داخل المفاعل النووي، ويمكن وصف ذلك كالآتي:

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{239}_{92}U$$

$$^{239}_{92}U \longrightarrow ^{239}_{93}Np + \beta$$

$$^{239}_{93}NP \longrightarrow ^{239}_{94}Pu + \beta$$

وتجدر الإشارة، إلى أن معدل إنتاج البلوتونيوم داخل المفاعل النووي يختلف، تبعاً لنوع هذا المفاعل، ولأسلوب تهدئة النيوترونات داخله (أي تحويلها من نيوترونات سريعة إلى نيوترونات حرارية وبطيئة)، وكذلك تبعاً للتشكيل الهندسي للب المفاعل، وغيرها.

● الوقود الاندماجي

تتكون أهم أنواع الوقود النووي الاندماجي من نظائر العناصر الخفيفة، مثل نظائر الديتيريوم٢ ($^{2}_{1}H$)، والتريتيوم٣ ($^{3}_{1}H$)، والليثيوم٦ ($^{6}_{3}Li$)، والليثيوم٧ ($^{7}_{3}Li$) حيث إن نظير الديتيريوم(D) هو نظير مستقر للهيدروجين (لا يتفكك إشعاعياً)، وهو موجود في الطبيعة في المادة المعروفة باسم الماء الثقيل، الذي يتكون الجزيء الواحد منه من ذرتي ديتيريوم٢ (بدلاً من ذرتي هيدروجين١ وذرة أكسجين١٦). ويوجد الديتيريوم٢ في الطبيعة في المياه بما فيها مياه البحار والمحيطات بنسبة تبلغ حوالي ٠,٠١٤٨٪ بالنسبة لنظير الهيدروجين ($^{1}_{1}H$). بذلك يمكن القول: إن كل طن من المياه الموجودة على سطح الأرض يتضمن حوالي ٣٢ جراماً من نظير الديتيريوم٢، لذلك تقدر احتياطيات هذا النظير في المياه على سطح الأرض بحوالي ٤٥-٥٠ ترليون (أي مليون مليون) طن، وهي الكمية التي يكفي استغلال ١٠٪ منها لإمداد العالم كله بالطاقة اللازمة لعشرات الملايين من السنين، عند النجاح في استغلال الطاقة الاندماجية.

أما التريتيوم ($^{3}_{1}H$) فهو نظير آخر للهيدروجين، وهو نظير مشع، بعمر نصفي يبلغ ١٢,٣٥ سنة، ويتفكك تلقائياً إلى الهيليوم ($^{3}_{2}He$) الخامل والمستقر إشعاعيا مع إصدار جسيمات بيتا (β) منخفضة الطاقة. ويعد نظير التريتيوم شديد الندرة في الطبيعة، حيث لا يتجاوز مخزونه في المياه على سطح الكرة الأرضية عن ٢٠ كجم، وبذلك يستحيل استخلاص أى كمية ضئيلة منه في المياه. ومع ذلك فإنه يسهل تحضير كميات كبيرة منه، عن طريق قذف عنصر الليثيوم الذي يتضمن نظيري الليثيوم٦ والليثيوم٧ بالنيوترونات. حيث يؤدى قذف نواة الليثوم٦ بنيوترون، إلى تكوّن ذرة هليوم٤، وذرة تريتيوم٣، وفقاً للتفاعل النووي التالي:

$$^{6}_{3}Li + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{3}_{1}H$$

كما أنه عند قذف نظير الليثيوم٧، بالنيوترون، فإنه قد تحدث استطارة (أي تشتت) غير مرنة للنيوترون، مع منح جزء من طاقته لنواة الليثيوم٧، التي سرعان ما تتفكك إلى ذرة هليوم٤ وذرة تريتيوم، وفقا لتفاعل التشتت غير المرن التالي:

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{3}_{1}H + ^{1}_{0}n$$

ويمثل هذين التفاعلين أحد المصادر المهمة للتريتيوم المستخدم في التفجيرات النووية الاندماجية (المعروفة بالقنابل الهيدروجينية).

ويوجد عنصر الليثيوم بنظيريه ضمن مكونات الهواء الجوي بنسبة تركيز محدودة، كما يوجد في الماء بنسبة تركيز تبلغ حوالي ٠,١٨ جرام في المتر المكعب، بذلك يزيد مخزون الليثيوم على الأرض عن مخزون بعض أنواع الوقود الأحفوري كالنفط. وتبلغ نسبة وفرة نظير الليثيوم٦ في الليثيوم الطبيعي حوالي ٧,٥ ٪، بينما تبلغ هذه النسبة لنظير الليثيوم ٧ حوالي ٩٢,٥ ٪. وتجدر الإشارة، إلى أنه يسهل فصل نظيري الليثيوم عن بعضهما بالعديد من الطرق الفيزيائية لوجود فرق محسوس في كتلتيهما (يزيد على ١٦,٦ ٪) الأمر الذي لايتحقق عند فصل نظيري اليورانيوم٢٣٥، ٢٣٨، والتي لا يتجاوز فرق الكتلة بينهما ١,٢٧ ٪.

توليد الطاقة النووية

تتولد الطاقة النووية أساساً من خلال تفاعل الانشطار النووي لبعض النوى الانشطارية أو القابلة للانشطار (وهي نظائر ثقيلة)، أو من خلال تفاعل الاندماج النووي لبعض النظائر الخفيفة، مثل نظائر الهيدروجين. عموما لايحدث الانشطار النووي إلا إذا كان مجموع كتل الذرات الداخلة في التفاعل الانشطاري أعلى من مجموع كتل جميع نواتج الانشطار. ويحدث هذا الأمر عند انشطار النظائر الثقيلة، الانشطارية أو القابلة للانشطار، حيث يتحول فرق مجموعي الكتل الداخلة في التفاعل الانشطاري والناتجة عنه إلى طاقة (وفقا لعلاقة أينشتين لتكافؤ الكتلة(m) والطاقة (E)، وذلك بضرب فرق مجموعي الكتل الداخلة والخارجة في مربع سرعة الضوء، التي تساوي حوالي ٣٠٠ مليون متر/ثانية). كذلك فإنه عند اندماج نوى الذرات الخفيفة مثل نوى نظائر الهيدروجين تكون الكتلة الناتجة عن الاندماج أقل من كتلتي النواتين المندمجتين، وبالتالي يتحول فرق الكتلة إلى طاقة وفقاً لعلاقة التكافؤ السابقة. وهناك طرق أخرى لتوليد كميات ضئيلة جداً من الطاقة الكهربائية من المصادر المشعة، وليس نتيجة الانشطار أو الاندماج، لاستخدامها

لتغذية بعض الأجهزة المعمرة بالجهد الكهربائي، كأجهزة تنظيم ضربات القلب التي تغرس في مرضى القلب، أو مصادر التغذية بالكهرباء لبعض الأجهزة الصغيرة في الأماكن النائية المعزولة عن مصادر الكهرباء.

● طاقة الانشطار

يتحرر عند انشطار نواة واحدة من نوى المواد الانشطارية أو القابلة للانشطار طاقة تتراوح بين حوالي ١٩٠ – ٢١٠ ميغا إلكترون فولط تبعا لنوع الشظيتين النواتين المتكونتين عن الانشطار). تنتج نواة اليورانيوم٢٣٦ بمجرد امتصاص نواة اليورانيوم٢٣٥ للنيوترون الحراري، ثم تنشطر (ذرتين)، متوسطتي الكتلة، وعدداً (ν) من النيوترونات السريعة، وكمية من الطاقة الحركية مقدارها (Q) لنواتج الانشطار من شظايا ونيوترونات، وذلك وفقاً للتفاعل التالي:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{93}U \longrightarrow {}^{236}_{92}U \longrightarrow {}^{A1}_{z1}F + {}^{A2}_{z2}F + \nu\, {}^{1}_{0}n + Q $$

وتختلف شظايا الانشطار وعدد النيوترونات الناتجة من انشطار لآخر، حيث تنحصر نواتج الانشطار بين نظائر الخارصين (Zn)، والجادولينيوم (Gd). فعلى سبيل المثال، يمكن أن ينتج عن الانشطار نظيري السترونشيوم٩٤ والزينون١٤٠ ونيوترونين، وفقاً لتفاعل الانشطار التالي:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \longrightarrow {}^{236}_{92}U \longrightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2\,{}^{1}_{0}n + Q $$

وبسبب أن ناتجي الانشطار دائماً نشطين إشعاعياً نتيجة لزيادة نسبة النيوترونات، فإنهما تتفككان أكثر من تفكك متتابع مصدرين جسيمات بيتا في كل مرة، وفي أحيان قد تُصدر النظائر الوليدة المتكونة إشعاعات جاما (γ) عقب تفكك بيتا. من ذلك: تفكك نظير الاسترونشيوم٩٤ باعثاً جسيم بيتا ونيوترينو مضاد إلى الإيتريوم٩٤ المشع، الذي تفكك بدوره باعثاً جسيم بيتا آخر ونيوترينو مضاد (غير مبين على التفاعل)، ومكوناً الزركونيوم٩٤ المستقر، وفقا لسلسلة التفكك المتتابع التالية:

$$ {}^{94}_{38}Sr \longrightarrow \beta^{-} + {}^{94}_{39}Y \longrightarrow \beta^{-} + {}^{94}_{40}Zr $$

كذلك يتفكك الزينون١٤٠ إلى السيزيوم١٤٠، الذي يتفكك بدوره إلى الباريوم١٤٠، ومنه إلى اللانثانيوم١٤٠، مع إصدار جسيم بيتا ونيوترينو مضاد في كل مرة، وكذلك إصدار بعض فوتونات جاما، ثم يتفكك هذا الأخير إلى السلينيوم١٤٠ المستقر، وفقاً لسلسلة التفككات المتتابعة التالية:

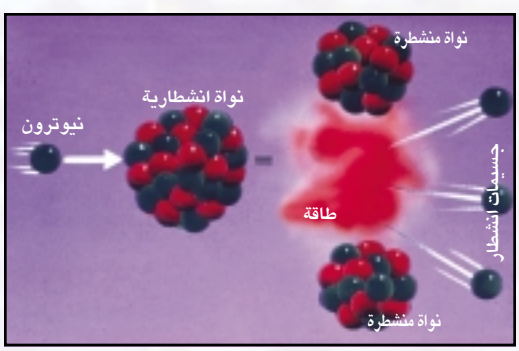
$$ {}^{94}_{54}Xe \longrightarrow \beta^{-} + {}^{140}_{55}Cs \longrightarrow \beta^{-} + {}^{140}_{56}Ba \longrightarrow \beta^{-} + {}^{140}_{57}La + {}^{140}_{58}Ce $$

وفي جميع التفككات ، تنطلق جسيمات بيتا (β) بطاقات حركية متفاوتة كما تحمل فوتونات جاما (γ) كميات أخرى من الطاقة.

تتوزع الطاقة المتولدة عن انشطار ذرة واحدة (أي الـ ٢٠٠ م إ ف في المتوسط)، وفقا لما يلي:

- شظيتا الانشطار (١٦٧م أ ف).
- نيوترونات الانشطار(٦–٧ م أ ف).
- إشعاعات جاما المنطلقة لحظة الانشطار(٥–٦ م أ ف).
- إشعاعات جاما المنبعثة نتيجة تفككات بيتا(٥م أ ف).
- جسيمات بيتا الناتجة عن التفكك المتتابع لشظيتي الانشطار(٥م أ ف).
- جسيمات النيوترنيو المضادة (١١ م أ ف).

وتتحول الغالبية العظمى من الطاقة الحركية للنواتج المذكورة إلى طاقة حرارية داخل لب المفاعل ومجمع الوقود الحرج. وفي معظم مفاعلات القدرة النووية تعتبر كمية الطاقة المتحولة إلى طاقة حرارية في لب المفاعل عن انشطار ذرة انشطارية واحدة مساوية لحوالي ١٩٠ (م إ ف)، وهي تكافئ ٣,٠٤×١٠-١١ حول (بوحدات الطاقة في النظام المعياري العالمي). لذلك، فإنه للحصول على قدرة حرارية تعادل ١واط من مفاعل نووي، فإنه يجب أن يحدث فيه عدد من الانشطارات في الثانية الواحدة يساوي مقلوب المقدار السابق، أي يساوي ٣,٢٩×١٠١٠ انشطار في الثانية الواحدة.



● نمط التفكك الانشطاري.

● طاقة الاندماج

تتعدد تفاعلات الاندماج التي يتميز كل منها بإطلاق كميات عالية متفاوتة من الطاقة إلا أنها رغم ذلك غير عملية ، إما لندرة مواردها في الطبيعة أو لصعوبة الاندماج النووي بسبب التنافر الكهربائي الشديد بين نواتي نظيري الاندماج لكبر شحنة إحدى النواتين، ومن أشهر هذه التفاعلات تفاعلاً الاندماج بين ذرتين من الديوتيريون (D) :

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H + 4.0\ (MeV) $$

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 3.3\ (MeV) $$

وتفاعل الاندماج بين ذرة الديوتيريوم (D). وذرة التريتيوم(T)، وذلك وفق التفاعل التالي:

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17.6\ (MeV) $$

ويتضح أن التفاعل الاندماجي الأخير يعطي أكبر مردود للطاقة (١٧,٦ م إ ف) للاندماج الواحد. لذلك تركز مشاريع تطوير وإنتاج مفاعلات الاندماج النووي، حالياً على هذا التفاعل، الذي يتميز بإمكانية حدوثه عند درجات حرارة منخفضة، نظراً لصغر قوة التنافر بين نواتي الاندماج، إلا أنه مما يؤسف له أن الوقود الاندماجي لايستخدم في الوقت الحالي إلا للتدمير، لتصنيع القنابل الهيدروجينية والقنابل ثلاثية الطور، أما الاستخدام السلمي لهذا الوقود كمصدر للطاقة، فمازالت تعترضه العقبات التقنية، التي تتمثل أساساً في عدم السيطرة على معدل حدوث الاندماج الحراري، وانطلاق الطاقة دفعة واحدة، ولايتوقع استغلال هذه الطاقة سلمياً قبل عام ٢٠٢٠–٢٠٣٠م وبذلك اقتصر استخدام

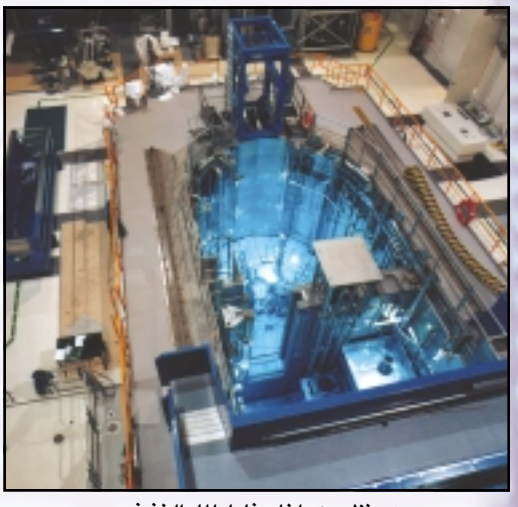
هذا الوقود حتى الآن على تصنيع الأسلحة النووية الاندماجية.

المفاعلات النووية

تم خلال العقود الخمسة الماضية تطوير وتشغيل نوعيات متعددة من مفاعلات القدرة الكهربائية، تختلف من حيث نوع الوقود المستخدم (كاليورانيوم الطبيعي أو المثرى بدرجات متفاوتة من الإثراء). ويمكن تصنيف مفاعلات القدرة على أساس نوع المبرد المستخدم (كالماء الخفيف أي العادي أو الغاز مثل ثاني أكسيد الكربون أو الهليوم أو فلز الصوديوم المصهور)، أو على أساس نوع المهدئ (مثل الماء الخفيف أو الثقيل أو الجرافيت أو حتى بدون مهدئ مثل المفاعلات الولودة السريعة)، حيث بلغ عدد المفاعلات الذرية في العالم حتى نهاية عام ٢٠٠٢م مايزيد عن ١٠٦٠٠ مفاعل .

● مفاعلات الماء الخفيف

تعتبر مفاعلات الماء الخفيف (Liqht Water Reaetors-LWR) التي تبرد وتهدأ بالماء الخفيف الأكثر والأوسع انتشاراً ، فهي تساهم بإنتاج أكثر من ٨٦٪ من الكهرباء من خلال المفاعلات النووية في العالم ، وذلك باستخدام وقود من اليورانيوم الطبيعي المثري باليورانيوم ٢٣٥ ، والبلوتونيوم ٢٣٩، بنسبة تركيز تبلغ حوالي ٣٪ ، حيث تكون المادة الانشطارية هي مصدر الطاقة في هذه المفاعلات ، في حين لاتسهم المادة القابلة للانشطار بأي نسبة محسوسة من الطاقة المتولدة ، وقد تم تطوير أنواع عديدة من هذه المفاعلات تتراوح قدرتها مابين ٤٠٠ الى ١٥٠٠٠ ميقاواط .



● منظر من داخل مفاعل الماء الخفيف .

● مفاعلات الماء الثقيل

يتميز هذا النوع من المفاعلات بإمكانية استخدام وقود اليورانيوم الطبيعي أو ضعيف الإثراء باليورانيوم٢٣٥، مثل مفاعلات الكاندو (CANDU)، واستخدام الماء الثقيل كمهدئ، والماء الخفيف كمبرد. وقد تم تطوير أنواع متعددة من هذه المفاعلات في كندا بقدرات تتراوح ما بين ٦٥٠ ميغاواط حتى ٩٠٠ ميغاواط كهرباء لتعمل بوقود ضعيف الإثراء بدلا من اليورانيوم الطبيعي، وتبرد بالماء الخفيف بدلا من الماء الثقيل. وتتميز هذه المفاعلات الجديدة بإمكانية إعادة استخدام اليورانيوم ضعيف الإثراء الذي استهلك في مفاعلات الماء الخفيف ولم يعد صالحاً للاستخدام فيها، الأمر الذي يوفر نوعا من التآزر بين مفاعلات الماء الخفيف، ومفاعلات الماء الثقيل، والذي يمثل دعماً لدورة إعادة معالجة الوقود النووي، وإعادة تدوير البلوتونيوم٢٣٩ الناتج، إضافة إلى الدورات القائمة على تحويل الثوريوم٢٣٢ لليورانيوم ٢٣٣ الانشطاري.

● المفاعلات المبردة بالغاز

المفاعلات المبردة بالغاز هي مفاعلات يستخدم فيها اليورانيوم الطبيعي كوقود والجرافيت كمهديء واستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون كمبرد ، حيث يغلف الوقود المكون من ثاني اكسيد اليورانيوم بغلاف رقيق من سبيكة المغنيسيوم. وقد تم تطوير هذه المفاعلات لزيادة المردود الحراري لوحدة الحجم من لب المفاعل ، تبلغ كفاءة هذه المفاعلات في تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة كهربائية حوالي ٣٩٪ .

● المفاعلات المبردة بالماء الخفيف والمهدأة بالجرافيت

انتشر تصميم المفاعلات المبردة بالماء الخفيف والمهدأة بالجرافيت

● مفاعل ماء ثقيل (CANDU) .

تحت الاسم الروسي المعروف (RBMK)، ذات القدرة ١٠٠٠ ميغاواط. ويتم احتواء وقود هذه المفاعلات في أنابيب كبيرة نسبياً، وتبرد بالماء العادي المعروف بالخفيف الذي يسري في الأنابيب تحت ضغط مرتفع، ومحاطة بكتل من الجرافيت التي تعمل كمهدئ.

● المفاعلات الولودة السريعة

تقوم جميع المفاعلات السابقة على مبدأ استخدام النيوترونات الحرارية لشطر ذرات اليورانيوم ٢٣٥ أو البلوتونيوم٢٣٩ بعد تهدئة النيوترونات السريعة الناتجة عن الانشطارات النووية باستخدام مواد التهدئة الخفيفة المتنوعة، مثل الماء الخفيف أو الثقيل، أو الجرافيت. وهنا ينبغي الإشارة إلى أن قدرة النيوترونات الحرارية أو البطيئة على تحويل المادة القابلة للانشطار مثل اليورانيوم ٢٣٨ إلى مادة انشطارية وهي البلوتونيوم ٢٣٩، هي قدرة محدودة للغاية. أما المفاعل الولود السريع فهو مفاعل يعمل بالنيوترونات السريعة المتولدة عن الانشطارات النووية دون تهدئة، حيث لا تستخدم فيه أي مادة مهدئة للنيوترونات السريعة، وبذلك يتم تحاشي تهدئة النيوترونات أو خفض سرعاتها. وتتميز النيوترونات السريعة بمقطع عرضي (أي باحتمالية) أكبر على التفاعل مع المادة القابلة للانشطار. وهي اليورانيوم ٢٣٨، وتكوين اليورانيوم ٢٣٩، الذي سرعان ما يتحول إلى البلوتونيوم ٢٣٩ الانشطاري. وبذلك يمكن توليد كميات أكثر من المادة الانشطارية لزيادة معدل تكونها في هذه المفاعلات،

مقارنة بالكميات المستهلكة. ويعود السبب في تسمية هذه المفاعلات بالولودة السريعة (Fast breeder reactors-FBR) إلى أن كمية مادة البلوتونيوم الانشطارية المتولدة فيها تزيد على كمية المادة المستهلكة، فضلا عن استخدام النيوترونات السريعة. وتجدر الإشارة إلى أن كفاءة تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية في المفاعلات الولودة السريعة تبلغ ٤٠ ٪، الأمر الذي يزكيها على غيرها من المفاعلات النووية.

ومن التصاميم القديمة للمفاعلات الولودة السريعة التي نفذت بالفعل، هو مفاعلات الفلز المنصهر (Fusible Material Reactors) الذي يستخدم فلز الصوديوم كمبرد. وتعمل الآن في العالم ٧ مفاعلات من هذا النوع، أكبرها قدرة هو المفاعل الفرنسي (Super Phinex)، بقدرة ١٢٠٠ ميغاواط كهرباء، ويوجد مفاعل آخر عامل بقدرة ٦٠٠ ميغاواط حرارة من الطراز (BN-600) في روسيا.

● مفاعلات الاندماج النووي

تقوم مفاعلات الاندماج النووي على تسخين خليط من نظائر الهيدروجين أو الليثوم عند درجة حرارة كبيرة تصل إلى حوالي ٨٠-٩٠مليون درجة مئوية (أعلى من الدرجة الداخلية للشمس) للوصول بمواد الخليط إلى الحالة الرابعة (البلازما)، والتي تعرف بأنها الحالة التي تكون عندها جميع ذرات المادة متأينة (أي يكون الإلكترون منفصلاً عن النواة)، وبالتالي الحصول على اندماج نووي متواصل. ويجب احتواء البلازما بعيداً عن جدران الوعاء حتى لاتفقد طاقتها نتيجة التصادمات، فيتوقف التفاعل الاندماجي خلال أجزاء صغيرة من الثانية ، ويكون ذلك بعدة طرق مثل: طريقة الجاذبية كما يحدث في النجوم، وطريقة القارورة المغناطيسية المعروفة باسم "توكوماك"، وطريقة القصور الذاتي وغيرها. ويرى العلماء أن أنجح الطرق العملية لاحتواء البلازما حالياً (بعيداً عن جاذبية النجوم) هي القارورة المغناطيسية التي تطبق فيها مجالات مغناطيسية خارجية شديدة لاحتواء البلازما الساخنة وعزلها عن جدران الوعاء الحاوي.

ولازالت هناك محاولات لتطوير مفاعلات لاحتواء البلازما، وإنتاج مفاعل اندماج نووي لتوليد الطاقة.

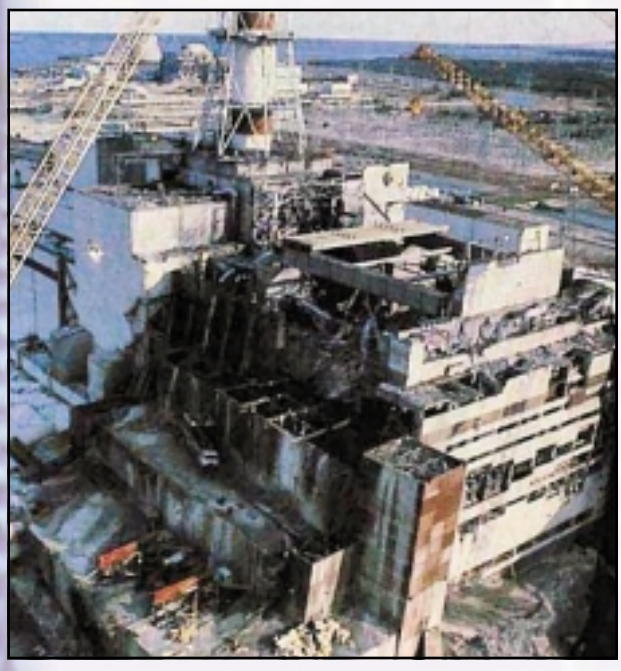
أما في مجال التدمير فقد استخدمت الطاقة الاندماجية منذ عام ١٩٥٣م، في القنابل ثنائية الطور المعروفة "بالقنابل الهيدروجينية"، أما في التفجيرات النووية الاندماجية فتستخدم قنبلة مصنوعة من مادة انشطارية لرفع درجة حرارة المواد الاندماجية التي تحيط بالمادة الانشطارية عادة، للدرجة اللازمة لإحداث الاندماج بين مكوناته.

التأثيرات البيئية

يصاحب دورات الوقود، بدءاً من الاستخراج ومروراً بالمعالجة والاستخدام، وانتهاءً بالتخلص من النفايات المتخلفة عن كامل الدورة، سلسلة من التأثيرات البيئية والصحية. وتصنف هذه التأثيرات إلى تأثيرات مباشرة وأخرى غير مباشرة. وتبرز التأثيرات المباشرة نتيجة التعرض لإطلاقات المواد الضارة بصفة مستمرة عن التشغيل الروتيني المستمر، أو عن الحوادث الطارئة، مما يحدث تغيرات في البيئة، قد تؤدي إلى فقدان سلامة البيئة، بصفة عامة، أو إلى تغيير نمط الأنظمة الإكولوجية، أو إلى فقدان حياة بعض الكائنات، خاصة الدقيقة. أما التأثيرات غير المباشرة: فقد لا يكون لها تأثير مباشر على البيئة أو على صحة البشر، وقد لا تظهر نتائجها بشكل فوري، ولكنها تستحدث تأثيرات على البيئة والصحة في المستقبل. ومن أمثلة التأثيرات غير المباشرة على البيئة والصحة: زيادة تسخين الأرض بفعل الغازات المحتبسة، وأهمها غاز ثاني أكسيد الكربون، الأمر الذي قد يؤدي إلى أضرار بشرية كثيرة وإلى انخفاض إنتاج الغذاء، وإلى إحداث تغيير في توزع الأمراض. ومن التأثيرات غير المباشرة، كذلك، سقوط الأمطار الحمضية التي قد تؤدي إلى إحداث تحريك للفلزات، بما فيها فلزات العناصر الثقيلة إلى السلسلة الغذائية ومياه الشرب.

ومع ذلك فإن مخاطر دورة الوقود النووي الانشطاري والقابل للانشطار تعد عند الحد الأدنى في سلسلة المخاطر الصحية والبيئية، سواء المباشرة أو غير المباشرة، بالمقارنة بمصادر الوقود الأحفوري (الفحم والنفط والغاز). فبعد تشغيل دورة الوقود النووي ، وتشغيل مفاعلات القوى بما يزيد على ١٠٠٠٠ مفاعل/سنة، حيث لم تسفر دورة الوقود النووي عن تأثيرات صحية أو بيئية يعتد بها، إلا بما وقع في حادث تشرنوبل في أبريل عام ١٩٨٦م، الذي تعود أسبابه إلى أخطاء فادحة ارتكبها المشغلون، مخالفين لقواعد التشغيل الآمن، فضلاً عن أحد خصائص المفاعل الذي وقع فيه الحادث، وهي المفاعلية الموجبة عند القدرات المنخفضة.

أما بالنسبة للطاقة النووية الاندماجية، فإنه على الرغم من أن التوقعات تؤكد عدم إمكانية استغلال هذه الطاقة سلميا قبل عام ٢٠٢٠ حتى ٢٠٣٠م، إلا أن جميع تقييم التأثيرات الصحية والبيئية لدورتها الكاملة تؤكد بأنها ستكون من أنظف مصادر الطاقة صحياً وبيئياً على الإطلاق .



● إحدى كوارث انفجار تشيرنوبل .