وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جـــــــــــامعـــة بـــــابـــــــل
كـلـــــية التـربية للعلوم الصـــــرفة
قـــــســـــم الفـــــيزيـــــــاء

تطبيق الفيزياء النووية في إنتاج الطاقة

هذا البحث مقدم الى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة _جامعة بابل
وهو جزء من متطلبات نيل على شهادة البكالوريوس في قسم الفيزياء

إشـــــــراف
الدكتور محمد عبد الحمزة
إعداد الطالبة
فـاطمه عـلاء سكران

2023م ——————————————————————1444هـ

بسم الله الرحمن الرحيم

صدق الله العظيم

الشكر والتقدير

أحمد الله تعالى أولًا وآخرًا على الفضل العظيم الذي منحني إياه، ثم أتقدم بالشكر لمن فضلهما لا ينقطع عليَّ والدي الحبيبين على كل جهودهم منذ لحظة ولادتي إلى هذه اللحظات الجميله أنتم نجاحي وفرحتي وكل شيء جميل في حياتي، ويسرني أن أوجه الشكر الجزيل لكل من نصحني أو أرشدني أو ساهم لو بشيء قليل أو وجهني في إعداد هذا البحث وإيصالي للمراجع والمصادر المطلوبة وعلى مساعدتي ومساندتي وإرشادي بالنصح والتعليم والتصحيح وعلى وجه الخصوص الأستاذ الفاضل (أ. د. محمد عبد الحمزه).

المحتـــــــويـــــات

الفقرة	العناوين	الصفحه
	الفـصـل الاول	
1-1	المقدمة	1
2-1	الفيزياء النووية	2
2-1	المفاعلات النووية	2
4-1	الآليـــــة	5
5-1	الانشطار النووي	6
6-1	توليد الحرارة	6
7-1	مكونات المفاعل النووي	7
8-1	كتلة الحرجة	8
9-1	الوقود النووي	9
10-1	تخصيب اليورانيوم	10
11-1	قضبان التحكم	12
12-1	مصفوف قلب المفاعل	12
13-1	وحدات الوقود	13
14-1	أنواع الوقود النووي	13
15-1	تصنيف المفاعلات النووية	15
16-1	المشاكل وتدوير المواد في المفاعلات النووية	17
	الفـصـل الثـــانـي	
1-2	منافع الطاقة النووية في الاستخدامات السليمة	18
1-1-2	مجال الطاقة	19
2-1-2	مجال تنمية الموارد المائية	22
2-2	أضرار الطاقة النووية في الاستخدامات السليمة	23
1-2-2	التلوث الإشعاعي	23
2-2-2	مصادر التلوث الإشعاعي	24
	الخـــــاتمـــــــة	28
	المـــصـــــــــادر	29

الخـــــلاصة

الصناعة النووية أصبحت من المجالات الحيوية في كل العالم وحيوية هذه الصناعة نبعت من كونها مصدراً عظيماً للطاقة والطاقة هي عضد التنمية .ولقد تبين أن هنالك تفاعلين نوويين ينتج عنهما طاقة هائلة : وهما تفاعل الإنشطار وتفاعل الإندماج .

إن حدوث الإنشطار أو الإندماج تحت شروط معينة دون أي تحكم في سرعة التفاعل

يؤدى الى تصاعد هائل في تلك السرعة بحيث يتم إنشطار أو إندماج أنوية المادة المعدة لذلك خلال جزء صغير جداً من الثانية ويترتب على ذلك تولد طاقة هائلة محدثة إنفجارا مدمرا يعرف بالإنفجار النووي، وهذا هو المبدأ العام الذي تقوم عليه القنابل النووية بنوعيها الإنشطارية (النووية) والإندماجية (الهيدروجينية).إن الصناعة النووية لا تتم إلا إذا توفر لدينا الوقود النووي هو اليورانيوم المخصب بنسبة معينة .

إن المفاعلات النووية تختلف بحسب نوع الوقود المستخدم ونسبة تخصيبه ونوع المهدئ والمبرد والشكل الهندسي للمفاعل كما تختلف المفاعلات النووية من حيث الغرض الذي أنشأت من أجله فمنها ما أنشأ بغرض إنتاج طاقة حرارية هائلة واستخدامها في إنتاج الكهرباء أو إزالة ملوحة مياه البحر أو تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة دفع لتحريك السفن والغواصات والصواريخ ، والغرض الثاني الإستفادة من الطاقة الحركية الكبيرة للنيوترونات في انتاج نظائر مشعة واستخدام الإشعاع الناتج عنها في الأغراض المختلفة مثل الطب والزراعة والتغذية .

ويتم أولا إنتاج الوقود النووي وتصميم المفاعل النووي بالإضافة إلى دراسة كل العوامل المؤثرة على الإنشطار النووي وإجراء الحسابات الدقيقة لكل العمليات الهندسية ودراسة كل الخواص الفيزيائية والكيميائية للمواد الداخلة في الصناعة وأخيرً يجب متابعة الأضرار الناتجة عن المفاعلات النووية الصناعة النووية ومعالجتها بدقة وإحكام وبصورة جذرية .

الفصل الاول

1-1_المقدمة:

في 27 يونيو 1954 تم إنشاء محطة الطاقة النووية الأولى في العالم أوبنينسك لتوليد الكهرباء لتشغيل شبكة الكهرباء في الاتحاد السوفييتي وسميت أوبنينسك كأول محطة طاقة كاملة في العالم. في 17 أكتوبر 1956 تم افتتاح ثاني محطة في إنجلترا. كأول محطة للطاقة على نطاق كامل في العالم مخصصة فقط لإنتاج الكهرباء.

ويقول خبراء الصناعة النووية إن التقنية والإشراف الجديدين جعلا من المحطة النووية أكثر أمانا، ولكن وقعت الحوادث فا منذ وقوع كارثة تشيرنوبيل في عام 1986 حتى اليوم وقعت حوادث كثيرة ووقع ثلثا هذه الحوادث في الولايات المتحدة. ووفقا لفريق متعدد التخصصات من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في عام 2003 قدر أنه نظرا للنمو المتوقع للطاقة النووية من عام 2005 إلى عام 2055، فمن المتوقع حدوث أربعة حوادث نووية خطيرة على الأقل في تلك الفترة. ومع ذلك فإن دراسة معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا لا تأخذ في الاعتبار التحسينات في مجال السلامة منذ عام 1970.[1]

مفهوم الطاقة النووية هي شكل من أشكال الطاقة المنبعثة من النواة، نواة الذرات، المكوَّنة من بروتونات ونيوترونات. وهذا المصدر من مصادر الطاقة يمكن إنتاجه بطريقتين: الانشطار – عندما تنقسم نوى الذرات إلى عدة أجزاء - أو الاندماج – عندما تندمج النوى معاً.

الطاقة النووية التي يتم تسخيرها حول العالم اليوم لإنتاج الكهرباء هي من خلال الانشطار النووي، بينما التكنولوجيا لتوليد الكهرباء من الاندماج فلم تزل في مرحلة البحث والتطوير. وستستكشف هذه المقالة الانشطار النووي وايضاً القوى النووية هي مصدر طاقةٍ منخفض الكربون، لأنَّ محطات القوى النووية، وعلى عكس محطات توليد الطاقة بالفحم أو النفط أو الغاز، لا تنتج عمليًّا ثاني أكسيد الكربون أثناء تشغيلها. وتوّلِد المفاعلات النووية ما يقرب من ثلث الكهرباء الخالية من الكربون في العالم وهي ضرورية لتحقيق الأهداف المتعلقة بتغيُّر المناخ. وتعتبر الطاقة النووية من أكبر الاكتشافات والإنجازات خلال القرن الماضي, لكنها في

نفس الوقت تعتبر من أخطر الاكتشافات على الجنس البشري.

الطاقة المنبعثة نتيجةً لتفاعل نووي، وتحديدًا من انشطار نووي أو اندماج نووي. ومن الناحية العملية، تستخدم الطاقة النووية وقودًا مصنوعًا من اليورانيوم المُستخرج من الأرض والمُعالج لإنتاج البخار وبالتالي توليد الكهرباء.

الجدير بالذكر أن الطاقة النووية هي المصدر الوحيد الذي يمكنه توليد كميات كبيرة من الكهرباء – تُعرف بكهرباء الحمل الأساسي – على نحوٍ موثوق دون انبعاث أي غازات ضارة مثل غازات الاحتباس الحراري.

إضافةً لذلك، تعدّ الطاقة النووية من المصادر التي تقلّ فيها بشدّة الآثار البيئية سواءً على الأرض أو الموارد الطبيعية، من بين جميع مصادر إنتاج الكهرباء الأخرى.

2-1 الفيزياء النووية (Nuclear Physics):

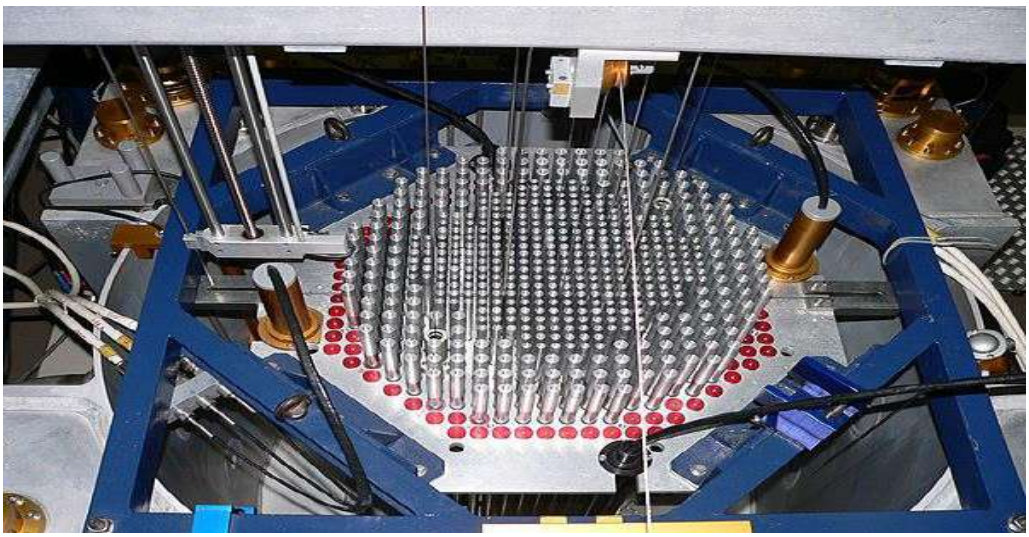
وهي أحد فروع الفيزياء والتي تتعامل مع بنية النواة الذرية والإشعاع من النوى غير المستقرة، ومن الجدير بالذكر أنّ النواة تصغر عن الذرة بحوالي 10000 مرة؛ فالذرة تتألف من النواة والبروتونات والنيوترونات، وهذه الذرات تنجذب لبعضها البعض بفعل القوى النووية بدلًا من الطاقة الذرية لأن الطاقة النووية أكبر من الطاقة الذرية النموذجية بحوالي مليون مرة.[2]

هذا يعني أنّ الفيزياء النووية يبحثها العلماء من خلال الجسيمات مثل البروتونات أو الإلكترونات، وتصدر منها أجسامًا مرتدة وشظايا نووية تُحلل اتجاهاتها وطاقاتها للكشف عن الهيكل النووي وقوته النووية؛ فالتفاعل الضعيف هو المسؤول عن إنتاج أشعة بيتا، أما تجارب الاصطدام النووي فتُنتج حزمًا من جسيمات عالية الطاقة بما فيها الجزيئات غير المستقرة (الميزوناتالتي) التي تنتج من الاصطدامات النووية التي يُطلق عليها اسم مصانع الميزون، وخلال هذا النشاط الإشعاعي وخلال الاصطدامات يحدث الانهيار النووي؛ مما يعني تغيير التركيب النووي، وكلما حدث تغيير في الشحنة النووية خلال الانشطار والانصهار كلّما ظهرت نوى غير مستقرة؛ تنقسم لنوى أصغر، أو تندمج مع نوى أكبر.[2]

عليه فإنّ الفيزياء النووية هي دراسات للبروتونات والنيوترونات في مركز الذرة، والتفاعلات التي تحدث بينها في مساحة صغيرة جدًا لا تتجاوز بضعة فيومترات، ومن أمثلة التفاعلات النووية الاضمحلال الإشعاعي، والانشطار، وتفكك النواة، والاندماج، واندماج النوى[3]

3-1 المفاعلات النووية(Nuclear Reactors):

المفاعل النووي هو جهاز ضخم أو محطة قوى تستخدم لتوليد تفاعل نووي متسلسل مُسْتَدَام وللتحكم فيه، أو بتعبير أدق للتحكم في معدل سير التفاعل النووي بحيث يمكن السيطرة عليه والاستفادة من طاقته لفترة طويلة. من المفاعلات النووية أنواع صغيرة تستخدم في البحوث العلمية ومنها ما هو محطة قوى تولد الكهرباء باستغلال الطاقة النووية. فشل نظام التحكم في معدل سريان التفاعل النووي المتسلسل يؤدي إلى انصهار المفاعل؛ هذا لأن المفاعل يطلق طاقته كلها دفعة واحدة في زمن قصير، كما حدث في مفاعل تشيرنوبيل.



الشكل رقم(1) يوضح قلب مفاعل "كروكاس" CROCUSوهو مفاعل نووي صغير للأبحاث العلمية في "مدرسة دي لوزان الاتحادية للفنون التطبيقية" في سويسرا.

يعمل المفاعل النووي بوقود حيث تعمل نيوترونات على انشطار أنوية اليورانيوم أو البلوتونيوم فتتولد طاقة حرارية (اليورانيوم-235 والبلوتونيوم-239 هي المواد الانشطارية ولهما نفس الخواص). لا بد من التحكم في عمليات الانشطار النووي المتسلسلة داخل قلب المفاعل مع الحفاظ على الظروف المناسبة لاستمرار تلك التفاعلات بشكل دائم دون وقوع انفجارات. تنساب الطاقة النووية من المفاعل بشكل تدريجي في هيئة حرارة ترفع درجة حرارة الماء المحيطة بوحدات الوقود النووي كما يرتفع ضغط البخار في خزان المفاعل. والمفاعل النووي، المعروف سابقا باسم كومة ذرية، كان كومة من اليورانيوم والجرافيت، وكان جهاز يستخدم لبدء والتحكم في عدد النيوترونات المتفاعلة مع اليورانيوم للبقاء على سلسلة تفاعلات نووية مستدامة، من دون زيادة للتفاعل حتى لا يحدث انفجار. ويتم تحديد عدد النيوترونات المتفاعلة مع أنوية اليورانيوم بواسطة قضبان من الكادميوم موزعة بين قضبان الوقود، يمتص الكادميوم النيوترونات الزائدة.

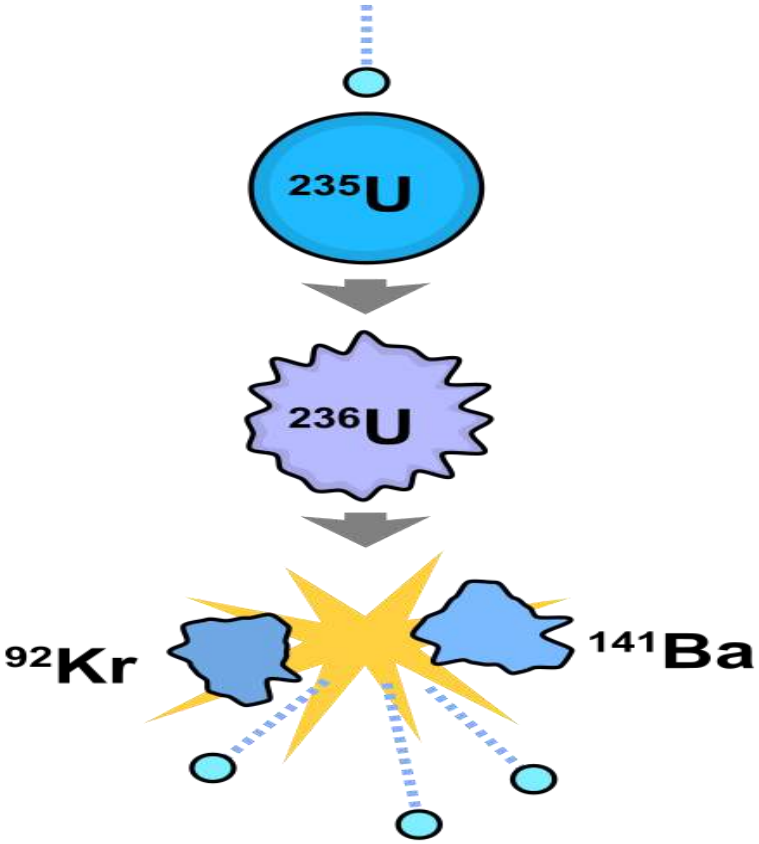
تستخدم المفاعلات النووية في محطات الطاقة النووية لتوليد الكهرباء ودفع السفن والغواصات. أحد أنواع المفاعلات النووية هو مفاعل الماء الخفيف الذي يعمل باليورانيوم المخصب – به نحو 5و3 % من اليورانيوم-235 القابل للانشطار عند امتصاصه نيوترونا – وتبلغ كمية اليورانيوم الكلية التي تحتوي على يورانيوم-235 ويورانيوم-238 في مفاعل القوى نحو 100 طن. تعمل الطاقة الحرارية الناتجة على تسخين الماء المحيط باليورانيوم حتى درجة الغليان، فيتولد بخار عند ضغط عالي. هذه «الكومة» الذرية الغاطسة في الماء موجودة داخل صهريج المفاعل (انظر الشكل 1). يتم نقل البخار عالي الضغط عبر التوربينات البخارية فيدور وهذا يقوم بتدوير المولد الكهربائي الذي ينتج الكهرباء. يمكن استغلال دوران التوربين في دفع مراوح سفينة أو غواصة أو لإدارة المولدات الكهربائية. ويمكن استخدام الماء الساخن المتولد من تفاعل انشطار اليورانيوم من حيث المبدأ في العمليات الصناعية أو للتدفئة في المناطق الباردة.

كما تستخدم بعض المفاعلات النووية الصغيرة لإنتاج نظائر مشعة للاستخدام الطبي والصناعي، أو لإنتاج البلوتونيوم-239 من اليورانيوم الطبيعي؛ وعلى وجه التحديد من اليورانيوم-238 بضربه بالنيوترونات فيمتصها ويتحول إلى بلوتونيوم-239 . يمكن استخدام البلوتونيوم-239 الناتج في صنع الأسلحة النووية، فقد كانت قنبلة نجازاكي مصنوعة من البلوتونيوم-239 ؛ كما يمكن استخدام البلوتونيوم-239 بعد خلطه بنسبة نحو 4 % مع اليورانيوم الطبيعي في تشغيل مفاعل نووي يولد الكهرباء.

لأغراض البحث العلمي تبنى مفاعلات نووية صغيرة تنتج نيوترونات بغزارة وأشعة جاما – حيث تستخدم النيوترونات الناتجه فيه في فحص المواد والتعرف على تركيب المواد، وتحليل الشوائب في الأنهار والبحار والهواء. وحتى نيسان / أبريل 2014، أبلغت الوكالة الدولية للطاقة الذرية عن وجود 435 مفاعلا للطاقة النووية في 31 بلد حول العالم [4]

ويتوقع بعض الخبراء نقصاً في الطاقة الكهربائية المتولدة من الوقود النووي بسبب مقاومة بعض التجمعات السكنية التي لا ترغب في توليد الطاقة من اليورانيوم لخطورتها في حالة الانفجار. توجد تلك التجمعات في بلاد عديدة مثل ألمانيا والنمسا وإيطاليا، وهذا على الرغم من ظاهرة الاحتباس الحراري التي تسببها الانبعاثات الناتجة عن توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الفحم والنفط والأنشطة البشرية الأخرى مثل الانبعاثات الناتجة عن عمليات تكرير النفط وعوادم السيارات وغيرها. لذا فهناك اعتقاد سائد بأن الطاقة النووية هي السبيل الأمثل لسد هذا النقص في المستقبل.

4-1 الآليـــــة (Mechanism):



الشكل رقم (2) يوضح حدوث انشطار نووي مستحث. ويتم امتصاص النيوترون بواسطة نواة ذرة اليورانيوم -235، والتي تنقسم بدورها إلى عناصر أخف وزنا تتحرك بسرعة (منتجات انشطارية) ونيوترونات حرة عددها بين 2 و 3. ويمكن للنيوترونات الناتجة أن تتفاعل مع أنوية أخرى وبذلك يتزايد التفاعل وانشطار نوايا اليورانيوم-235 وهذا ما يسمى "تفاعل تسلسلي".

ومثلما تولد محطات الطاقة التقليدية الكهرباء عن طريق تسخير الطاقة الحرارية المنبعثة من حرق الوقود الأحفوري، تحول المفاعلات النووية الطاقة التي يطلقها الانشطار النووي الخاضع للتحكم إلى طاقة حرارية؛ تلك الحرارة تسخن الماء الذي يتحول جزء منه إلى بخار تحت ضغط عال يُدير توربينا وبالتالي مولد كهربائي.

5-1 الانشطار النووي (Nuclear Fission):

عندما تمتص نواة ذرية انشطارية كبيرة مثل اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم -239 النيوترون، فإنها قد تخضع للانشطار النووي. وتنقسم النواة الثقيلة إلى نويتين أخف أو أكثر، (منتجات الانشطار). وتطلق الطاقة الحركية الحرارية، وإشعاع غاما، والنيوترونات الحرة. ويمكن بعد ذلك لبعض النيوترونات الحرة أن تمتصها أنوية انشطارية أخرى، ويؤدي إلى المزيد من أحداث الانشطار، التي تطلق المزيد من النيوترونات (لأنه عندما تمتص نواة انشطارية نيوترونا يخرج من هذا التفاعل نيوترونين أو ثلاث يمكنها نظريا احداث تفاعلات انشطارية متتابعة)؛ ويعرف ذلك بتفاعل نووي متسلسل.

للسيطرة على مثل هذا التفاعل النووي التسلسلي، تستعمل قضبان من الكادميوم لامتصاص النيوترونات الزائدة بحيث يبقى تشغيل المفاعل في الحيز الآمن.[5] المفاعلات النووية عموما لديها أنظمة تلقائية لتنظيم معدل تفاعلات النيوترونات في "كومة" اليورانيوم " حتى لا يخرج معدل التفاعل عن الحيز الآمن.[6]

يتم الانشطار النووي لليورانيوم مثلا عندما يصتدم بها نيوترونا بطيئا (بطيء السرعة). ولكن بعد الانشطار تنتج من 2 إلى 3 من النيوترونات السريعة، تلك النيوترونات السريعة لا تستطيع أنوية اليورانيوم امتصاصها. لهذا يستخدم الماء أولا لتقليل سرعة النيوترونات بحيث يمكنها مشاركة في التفاعل واستمراريته ووالوظيفة الثانية للماء هي نقل الحرارة المتولدة لإنتاج الكهرباء. (تعمل نحو 74.8٪ من المفاعلات في العالم بالماء العادي، ويسمى الماء «مهديء»). نفس خاصية الماء كمهديء للنيوترونات يحملها الجرافيت، لهذا كانت أول المفاعلات على الأطلاق هي مفاعلات اليورانيوم التي تستخدم الجرافيت تسمى «كومة ذرية» Atomic pile.

طبقا لتقرير الوكالة الدولية للطاقة الذرية في عام 2019 توجد في العالم 454 مفاعل قوى نووي وعدد 226 مفاعل للأبحاث تعمل.[7][8][9]

6-1_توليد الحرارة(Thermogenesis):

يولّد قلب المفاعل الحرارة بعدة طرق:

1_يتم تحويل الطاقة الحركية من منتجات الانشطار إلى الطاقة الحرارية عندما تصطدم هذه النوى مع الذرات القريبة.

2_يمتص المفاعل بعض أشعة غاما المنتجة أثناء الانشطار ويحول طاقتها إلى حرارة.

3_كما أن الاضمحلال الإشعاعي من المنتجات الانشطار تنتج حرارة. يبقى الاضمخلال الإشعاعي مصدرا للحرارة لفترة طويلة حتى بعد إيقاف تشغيل المفاعل.

الكيلوغرام من اليورانيوم-235 (U-235) المنشطر أثناء التفاعلات النووية يطلق طاقة تزيد بثلاثة ملايين مرة تقريبا عما ينتجه 1 كيلوجرام من الفحم المحترق تقليديا (7.2 × 1013 جول لكل كيلوغرام من اليورانيوم 235 مقابل 2.4 × 107 جول لكل كيلوغرام من الفحم).[10][11]

7-1 مكونات المفاعل النووي(Components of a Nuclear Reactor):

المكوّنات الرئيسية الشائعة في أكثر أنواع محطات الطاقة النووية هي:

1_الوقود النووي

2_قلب المفاعل

3_مهدئ النيوترون

4_ذراع تحكم (تمتص النيوترونات)

5_غلاية (خزان المفاعل)

6_عنفة بخارية

7_مولد كهربائي

8_مكثف الماء

9_برج تبريد (غير مطلوب دائمًا ويمكن التبريد بمياه نهر أو بحر)

10_نظام التحكم الوقائي (منع الانفجار)

11_بناية الاحتواء

12_غرفة المراقبة

13_وسائل العمليات المستعجلة

14_حوض تخزين الوقود المستهلك

يتكون المفاعل النووي من الأجزاء التالية:

1_كومة الوقود النووي أو قلب المفاعل: قلب المفاعل النووي هو جزء من المفاعل النووي الذي يحتوي على مكونات الوقود النووي حيث تحدث التفاعلات النووية وتتولد الحرارة. في الغالب يكون الوقود عبارة عن يورانيوم منخفض التخصيب.[12]

2_**السائل المهدئ:** ويستعمل الماء عادة لخفض سرعة النيوترونات وبالتالي ينشط معدل التفاعل بين النيوترونات وأنوية الوقود النووي فيحدث الانشطار النووي. الانشطار النووي يكون مصحوبا بانتشار بين 2 إلى 3 نيوترونات جديدة وطاقة – وتستطيع تلك النيوترونات التفاعل مع أنوية أخرى من الوقود النووي وتحدث انشطارها، وهكذا ولذلك سمي هذا التفاعل بالتفاعل المتسلسل. المهديء يحمل حرارة التفاعل الناتجة التفاعل النووي ويسخن المهديء الذي هو الماء وينتج بخارا عاليا الضغط، يستغل في تشغيل التوربين.

3_**حاوية الضغط (خزان المفاعل):** تحيط بقلب المفاعل والماء، مصنوعة من الحديد الصلب ذات جدران سميكة (نحو 12 سم)، للاحتفاظ بضغط البخار عاليا، ولمنع تسرب الإشعاعات الناتجة من الانشطار النووي إلى الخارج والوقاية منها. يخرج بخار الماء بضغط يبلغ 400 ضغطا جويا وتكون درجة حرارته نحو 450 درجة مئوية في أنابيب واسعة سميكة من حاوية المفاعل (الغلاية)، وهي تسمى أحيانا خزان الضغط للمفاعل .

4_**مبادلات حرارية** يأتي البخار عالي الضغط من المفاعل إلى المبادلات لفصل دائرتي الماء: الدائرة الأولية للماء الذي يلف في المفاعل ويلامس الوقود النووي، وهذه تكون عالية الإشعاع نظرا لتلامسها مع الوقود النووي. لذلك تُفصل عن الدائرة الثانوية للماء الساخن المضغوط عن طريق المبدل الحراري. بالتالي يسخن الماء في الدائرة الثانوية عند مغادرته المبادل الحراري ويتحول إلى بخار ماء عالي الضغط والحرارة ويوجه في أنابيب شديدة التحمل إلى توربين لتوليد الكهرباء.

5_**مولد كهربائي** عملاق يديره التوربين ويولد التيار الكهربائي.

بذلك تتحول الطاقة النووية إلى طاقة حرارية ثم إلى طاقة حركة للتوربين والمولد الكهربائي الذي يحولها إلى طاقة كهربائية لتشغيل المصانع وإنارة المنازل.

8-1 الكتلة الحرجة(Critical Mass):

بهدف تحفيز سلسلة عمليات الانشطار النووي في مركز المفاعل النووي، يستعمل ما يسمى بالوقود النووي وهو في الغالب اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم-239. ومن أجل تسيير التفاعل المتسلسل يحتاج المفاعل أو القنبلة النووية لكمية من اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم-239 أكبر مما يسمى الكتلة الحرجة. قنبلة اليورانيوم-235 تحتاج إلى نحو 50 كيلوجرام، وقنبلة البلوتونيوم-239 تحتاج إلى كتلة حرجة أكبر من 6 كيلوجرام، فيهما يسير التفاعل المتسلسل بلا توقف ويؤدي للانفجار. أما في المفاعل النووي فإن الوقود النووي يتكون من اليورانيوم الطبيعي المحتوي على 3و5% من اليورانيوم-235 ولهذا يسمى «يورانيوم مخصب». ومن الممكن الحصول على وقود نووي من اليورانيوم الطبيعي المخلوط ببلوتونيوم-239 بنسبة 4% واستخدامها في المفاعل النووي الذي يسير فيه التفاعل بتحكم فلا ينفجر.

كمية الوقود النووي التي تستخدم لتوليد الكهرباء تصل ما بين 50 طن إلى 110 طن. يساعد الماء كمهديء للنيوترونات بالإضافة إلى قضبان امتصاص النيوترونات الزائدة على التحكم في سير التفاعل، فيسير هادئا ببطء ولا ينفجر المفاعل.

لتوضيح مفهوم الكتلة الحرجة تصوّر أن هناك كرة بحجم قبضة اليد مصنوعة من يورانيوم-235، بعد تحفيز أولي لعملية الانشطار النووي بواسطة تسليط حزمة من النيوترون على الكرة سيتولد في المتوسط عدد 2.5 من النيوترونات جراء هذا الانشطار الأول لنواة ذرة اليورانيوم-235. وهذا يكون كافياً لبدء انشطار ثانٍ في نواة أخرى من اليورانيوم-235. وأثناء هذه التفاعلات التسلسلية من الانشطارات في اليورانيوم يُفقد الكثير من النيوترونات الناتجة عن التفاعل وتخرج من سطح كرة اليورانيوم، وبفقد تلك النيوترونات يتوقف التفاعل النووي. لهذا يجب أن يكون معدل توليد النيوترونات داخل الكرة مساوٍ على الأقل لعدد النيوترونات المتسربة إلى الخارج حتى تستمر عمليات الانشطار، وتسمى تلك الحالة **الحالة الحرجة.** وهنا يأتي دور الكتلة الحرجة التي يمكن تعريفها بالحد الأدنى من كتلة مادة نووية معينة كافية لدوام سلسلات متعاقبة من الانشطارات.

إذا كان العنصر المستخدم في عملية الانشطار النووي ذو كتلة يتطلب تسليطاً مستمراً بالنيوترونات لتحفيز الانشطار الأولي للنواة فإن هذه الكتلة تسمى بالكتلة دون الحرجة.

إذا كان العنصر المستخدم في عملية الانشطار النووي ذو كتلة قادرة على تحمل سلسلات متعاقبة من الانشطار النووي حتى بدون أي تحفيز خارجي بواسطة تسليط نيوترونات خارجية فيطلق على هذه الحالة الكتلة فوق الحرجة وهي المرحلة المطلوبة لتصنيع القنبلة النووية.

تعتبر كل من أستراليا وكازاخستان وكندا وجنوب أفريقيا والبرازيل وناميبيا من أكبر الدول المصدرة لليورانيوم، ويباع عادة بسعر يتراوح من 80 – 100 دولار للكيلوغرام الواحد وبعد الحصول عليه يتم طحنه وتحويله إلى ما يسمى بالكعكة الصفراء التي يتم تحويلها فيما بعد إلى هيكسافلوريد اليورانيوم ويتم بعد ذلك عملية تخصيب اليورانيوم.

9-1 الوقود النووي (Nuclear Fuel):

الوقود النووي المستخدم في مفاعل الماء الخفيف هو اليورانيوم المخصب وهو يشكل على شكل وحدات قفصية الشكل تُسمى وحدات الوقود. وتتكون وحدة الوقود من عدد من قضبان الوقود محفوظة في أنابيب من سبيكة الزركونيوم بأعداد 17 في 17 من قضبان الوقود في هيئة قفص يبلغ مقطعه 45 سم في 45 سم وطوله نحو 4 متر.

يستخدم اليورانيوم المخصب في صورة أكسيد اليورانيوم ويكون في شكل أقراص أسطوانية بارتفاع 2.5 سم وقطر نحو 0.9 سم وتعبأ في الأنابيب من سبيكة الزركونيوم (تتحمل الحرارة العالية وقليلة امتصاصها للنيوترونات)، طول الأنبوب 4 متر وتغلق من طرفيها محكمان بحيث لا تخرج منها شوائب مشعة أثناء عمل المفاعل. يحتوي أكسيد اليورانيوم المخصب في العادة على نسبة من النظير الانشطاري اليورانيوم-235 تصل إلى 6و3 % ، ونسبة 3و96% يورانيوم-238. ونظرا لأن خام اليورانيوم الطبيعي يحتوي على 0.7% من اليورانيوم-235 الانشطاري فقط والباقي يورانيوم-238 لا ينشطر، فلا بد من استخدام اليورانيوم المخصب بنسبة بين 5و2 % و 0و4 % باليورانيوم-235 في المفاعلات التي تعمل بالماء العادي. ينقل الماء الحرارة العالية الصادرة من وحدات الوقود أثناء التشغيل، وترتفع درجة حرارته إلى نحو 500 درجة مئوية؛ وحدات الوقود والماء موجودان في خزان المفاعل من الفولاذ سميك، ويرتفع الضغط أيضا تحت تلك درجة الحرارة العالية ويتحول جزء من الماء إلى بخار يقوم بتشغيل مولد كهربائي لإنتاج الكهرباء. يعمل الماء في نفس الوقت كمهديء لسرعة النيوترونات المتولدة من التفاعل الانشطاري لليورانيوم-235، حيث أن تهدئة سرعة النيوترونات لازمة لكي تنشطر أنوية اليورانيوم-235 . نسبة اليورانيوم-235 المقدرة ب 6و3 % في وحدات الوقود النووي تنتج نيوترونات خلال التفاعل النووي وتعمل على استمرارية التفاعل التسلسلي.

10-1 تخصيب اليورانيوم (Uranium Enrichment):

عملية تخصيب اليورانيوم عبارة عن عزل نظير معين من مخلوط نظائر، وهذ النظير المعين هو اليورانيوم-235 الذي يصلح لإنتاج الطاقة الكهربائية في مفاعل نووي. اليورانيوم الطبيعي يحتوي على 7و0% من اليورانيوم-235 أما باقي اليورانيوم فهو اليورانيوم -238. والمطلوب من عملية التخصيب هو رفع نسبة اليورانيوم-235 في اليورانيوم الطبيعي إلى 5و3% حتى يمكن استخدامه في مفاعل نووي يعمل بالماء الخفيف. اليورانيوم المخصب إذا يمكن أن يكون ذو نسبة 5و3% من اليورانيوم-235 أو أعلى من ذلك (إنتاج أسلحة نووية يحتاج إلى تخصيب أعلى من 90%)، ويسمى الجزء من اليورانيوم المنزع منه اليورانيوم-235 «اليورانيوم المنضب».[13]

وتتم عملية التخصيب على مراحل حيث يتم في كل مرحلة عزل كميات أكبر من النظير المرغوب فيه (اليورانيوم-235) حيث يزداد اليورانيوم تخصيبا بعد كل مرحلة لحد الوصول إلى نسبة النقاء المطلوبة (5و3% لإنتاج الطاقة الكهربائية في مفاعلات نووية ؛ أو 90% لإنتاج أسلحة نووية).

على سبيل المثال اليورانيوم المخصب عبارة عن يورانيوم تمت زيادة نسبة نظائر اليورانيوم-235 فيه وازالة النظائر الأخرى مثل اليورانيوم-238. وعملية التخصيب هذه صعبة ومكلفة وتكمن الصعوبة في أن النظائر الذي يراد ازالتها من اليورانيوم شبيهة جدا من ناحية الكتلة الذرية والخواص الكيميائية للنظائر الذي يرغب بالإبقاء عليها وتخصيبها. وتتم عملية التخصيب باستخدام بطرق متعددة، كلها تعتمد على الحرارة العالية. الطريقة الأمريكية المتبعة في مشروع مانهاتن لغنتاج القنابل الذرية كانت بطريقة النفاذية ؛ حيث تختلف نفاذية اليورانيوم -235 عن نفاذية اليورانيوم-238 في السيراميك مثلا.

الطريقة الثانية التي يكثر استخدامها هي طريقة الطرد المركزي. وهناك طرق أخرى أكثر تعقيدا كاستعمال الليزر أو الأشعة الكهرومغناطيسية ولكنها ليست للأغراض الصناعية. معامل الفصل بين النظيرين عبر مرحلة واحدة هو 1.3 للطريقة الطرد المركزي بالمقارنة بمعامل 1.005 للانتشار الحراري عبر حاجز، وهي نسبة تعادل 1:50 من وجهة الطاقة المستخدمة. طريقة الطرد المركزي تتبع في تخصيب 54% من اليورانيوم المخصب في العالم.

وتبلغ نسبة اليورانيوم-235 الذي يراد تخصيبه من اجمالي ذرات اليورانيوم الطبيعي نسبة 0.7% فقط ولكن هذا الجزء هو المرغوب فيه لكونه يصلح للانشطار بواسطة تسليط نيوترون منخفض السرعة عليه ؛ وهذا ما يتم في مفاعل نووي يعمل بالماء الخفيف. أما اليورانيوم الطبيعي فيمكن من حيث المبدأ استخدامه في مفاعل نووي مع استخدام الماء الثقيل لتهدئة سرعة النيوترونات قبل اصطدامها باليورانيوم-235. أغلبية الجزء المتبقي من اليورانيوم الطبيعي بعد استخلاص جزء اليورانيوم-235 هو اليورانيوم-238 (أو «اليورانيوم المنضب» الذي يحتوي على نسبة أقل من 7و0% يورانيوم-235). تم تخصيب اليورانيوم لأول مرة في الولايات المتحدة أثناء الحرب العالمية الثانية لصناعة قنبلة هيروشيما التي ألقيت على اليابان في أغسطس 1945. القنبلة النووية الثانية التي ألقيت على نجازاكي كانت من البلوتونيوم-239، وبهما انتهت الحرب بين الولايات المتحدة واليابان بلا قيد ولا شرط. تم بناء 3 من المفاعلات النووية في ولايات تينيسي وأوهايو وكنتاكي وكانت الطريقة المستعملة عبارة عن ضخ كميات كبيرة من اليورانيوم على شكل غاز يورانيوم هيكسافلوريد (بالإنجليزية: uranium hexafluoride) في درجة حرارة عالية إلى حواجز ضخمة تحوي على ملايين الثقوب الصغيرة جدا وبسرعة نفاذية اليورانيوم -235 بالمقارنة بسرعة نفاذية اليورانيوم-238 في الحواجز تزداد نسبة اليورانيوم-235 في المخلوط على الناحية الخلفية من الحاجز. وبتتابع تلك العمليات الواحدة تلو الأخرى يمكن الوصول إلى نسبة يورانيوم-235 أعلى من 90% تصلح لصناعة قنبلة هيروشيما.

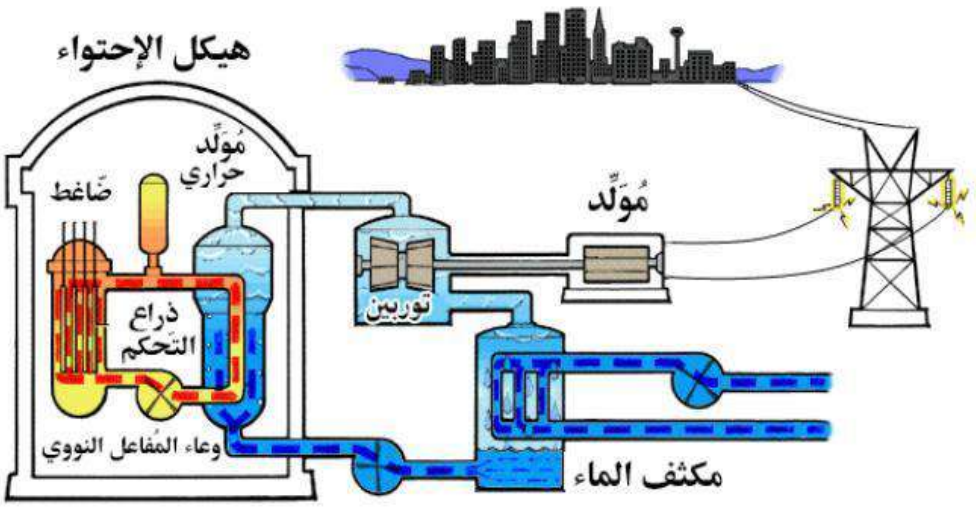
استغلال الفرق في سرعة النفاذية مكّن الولايات المتحدة من صناعة قنبلة هيروشيما، وتمتلك الولايات المتحدة يورانيوم مخصب من النوع العالي الخصوبة بنسبة 90%. ومن أساليب التخصيب الأخرى الأسلوب الذي يعرف بطريقة الطرد المركزي، وفيه يلزم أيضا تكرار الطرد المركزي في مرات عديدة.

وتقاس قدرة محطات تخصيب اليورانيوم في شروط نسبة فصل اليورانيوم -235 عن اليورانيوم-238. فبالنسبة لإنتاج الطاقة الكهربائية من مفاعل نووي يعمل بالماء الخفيف يكفي أن تكون نسبة اليورانيوم-235 نحو 5و3 %. كما تحتاج بعض مفاعلات البحوثيورانيوم مخصبا إلى درجة 20% بغرض الحصول على فيض كثيف من النيوترونات يستخدم في إجراء البحوث العلمية وفحص المواد. أما إنتاج أسلحة نووية فيحتاج إلى نسبة تخصيب أعلى من 90% من اليورانيوم-235.

11-1 قضبان التحكم (Control Rods):

تزود كل وحدة وقود بعدد من قضبان التحكم (4 أو 6) وهي مصنوعة من مادة شديدة الامتصاص للنيوترونات. يستخدم لهذا الغرض سبيكة من الصلب والبور أو معدن الكادميوم مشكّلة في هيئة قضيب يبلغ طوله 4 متر أيضا. عن طريق رفع أو خفض قضبان التحكم في قلب المفاعل يمكن التحكم في معدل سير التفاعل، حيث أنها تضبط عدد النيوترونات وتمتص الجزء الزائد منها من قلب المفاعل. ولتوقيف تشغيل المفاعل تغطّس جميع قضبان التحكم في قلب المفاعل فتمتص النيوترونات ويتوقف التفاعل النووي.

12-1 مصفوف قلب المفاعل(Reactor Core Array):



الشكل رقم (3) رسم يوضح انتقال الطاقة من المفاعل النووي مع الماء إلى بخار ماء عالي الضغط. دورة المبرد الأولي باللون البرتقالي ودورة الماء الثانية باللون الأزرق (بخار وماء يعود بعد التكثيف إلى خزان مولد البخار) البخار يدوّر توربين الذي يشغل المولد الكهربائي.

سنأخذ هنا مثال مفاعل الماء المغلي للتوضيح. يتكون قلب المفاعل من مصفوف شبكي أسطواني معدني يحتوي على فتحات رأسية توضع فيها وحدات الوقود. يبلغ قطر أسطوانة المصفوف نحو 4 متر وهو بارتفاع 4 متر ويتسع لأخذ نحو 200 من وحدات الوقود (يشبه من أعلى خلايا النحل). تحتوي وحدة الوقود على نحو 2/1 طن من اليورانيوم المخصب، أي أن المفاعل يعمل بنحو 100 طن من وقود اليورانيوم. نسبة تخصيب اليورانيوم تقدر بـ 7و3% يورانيوم-235. هذا بالنسبة لمفاعل قوى كبير ينتج الطاقة الكهربائية بقدرة 1000 ميجا وات.

13-1 وحدات الوقود(Fuel Units):

يوجد قلب المفاعل الذي يحتوي على 200 من وحدات الوقود في وسط خزان ضغط المفاعل، وهو يعتبر غلاية أسطوانية مغلقة قطر 5 متر وارتفاعها نحو 7 متر. يبلغ سمك جدار خزان الضغط للمفاعل نحو 25 سنتيمتر وهو مصنوع من الفولاذ. ينفذ من خزان الضغط أنابيب لضخ الماء فيه وأنابيب أخرى لخروج البخار من خزان الضغط وعودة البخار المكثف إليه. تغطى وحدات الوقود في قلب المفاعل بالماء النقي. الجزء العلوي من خزان الضغط في شكل القبة ويمكن فصله عن الخزان بغرض استبدال وحدات الوقود المستهلكة. وعند إغلاقه فيتم ذلك بإحكام حيث يصل الضغط داخله أثناء التشغيل نحو 400 ضغط جوي.

14-1 أنواع الوقود النووي:

1_ ثاني أكسيد اليورانيوم.

يستعمل ثاني أكسيد اليورانيوم المحتوي على نسبة 3 % من يورانيوم-235 الانشطاري في لمفاعلات الأكثر انتشارا، مثل مفاعل الماء المغلي ومفاعل الماء المضغوط في محطات القوى لتوليد الكهرباء.

2_ أكسيد مخلوط MOX

هو مخلوط من البلوتونيوم-239 واليورانيوم الطبيعي أو اليورانيوم المتبقي من عملية تخصيب اليورانيوم (يورانيوم منضب) وتكون مواصفات المخلوط معادلة لمواصفات الوقود المخصب باليورانيوم-235. وقد جرب استخدامه في عدة مفاعلات من مفاعل الماء المضغوط ومفاعل الماء المغلي، ونجح استخدامها ويستخدم بعضا منها إلى جانب الوقود النووي المعتاد في تموين المفاعلات النووية بالوقود.

وينتج البلوتونيوم-239 من مفاعلات الماء الخفيف المعتمدة على اليورانيوم المخصب، ويتم فصل البلوتونيوم من وحدات الوقود المستهلكة في مصنع خاص يقوم بتدوير المواد النووية reprocessing. كما يمكن استغلال البلوتونيوم الموجود في القنابل النووية بعد تفكيكها في إطار الحد من التسلح النووي، وخلطها مع اليورانيوم الطبيعي لتصنيع وحدات وقود تستخدم لإنتاج الطاقة.

3_الثوريوم.

يستخدم نظير الثوريوم-232 الذائب في الأملاح في مفاعل ملح منصهر لإنتاج الطاقة على المستوي الصغير، في مفاعلات تجريبية. وقد استخدم الوقود السائل المحتوي على الثوريوم في صورة مخلوط من الليثيوم والبيريليوم والثوريوم وفلوريد اليورانيوم: (72-16-12-0.4 mol%) LiF-BeF2-ThF4-UF4. ويتميز الوقود هذا الوقود المنصهر بدرجة حرارة تصل إلى 700 درجة مئوية، كما تبين الاختبارات إمكانية رفع درجة الحرارة هذه حيث أن درجة غليان المخلوط الملحي تبدأ عند 1400 رجة مئوية.

4_أملاح اليورانيوم.

جرى استخدام مفاعل المحلول المائي المحتوي على سولفات الأورانيل uranyl sulfate أو محاليل أخرى لليورانيوم بنجاح. ولكنه هذا النوع من المفاعلات لم ينفذ على المستوى الكبير لإنتاج الطاقة، ويرجع ذلك إلى سهولة انتشار المواد النووية في المناطق المجاورة للمفاعل في حالة حدوث حادث جسيم أثناء التشغيل.

5_وقود ماجنوكس magnox.

في إنجلترا يستخدم نوع من المفاعلات تبرد بثاني أكسيد الكربون ويستخدم فيها الجرافيت كمهدئ لسرعة النيوترونات وهي تعمل باليورانيوم الطبيعي (ليس مخصب) وتحفظ الوقود في أنابيب من سبيكة ماجنوكس. وتتكون سبيكة ماجنوكس من المغنسيوم والألمونيوم وهي سبيكة غير قابلة للصدأ وتستخدم فقط لتغليف اليورانيوم الطبيعي في المفاعل. واسم ماجنوس هي اختصار ل: Magnesium non-oxidising وتتميز تلك التغلفة بقلة امتصاصها للنيوترونات.

15-1 تصنيف المفاعلات النووية (Classification Nuclear Reactors):

تصنيف طبقًا لنوع التفاعل

نوعان أساسيان من التفاعل في الإطار النووي: انشطار نووي واندماج نووي. تفاعل الانشطار النووي هو النوع المستغل حاليًا في مفاعلات القوى وفي كل المفاعلات الأخرى المستخدمة اليورانيوم البلوتونيوم كوقود نووي. أما الاندماج النووي فلا يزال تحت البحث وربما يستغرق عشرات السنين وهو يستغل الهيدروجين الثقيل والتريتيوم كوقود وتلتحم فيه تلك العناصر لإنتاج الهيليوم وتنتج منه طاقة أكبر بكثير من طاقة انشطار اليورانيوم. الطاقة الناتجة من اندماج الهيدروجين بأنواعه هي السر وراء طاقة الشمس، فهي تفاعلات اندماج تولد تلك الطاقة الهائلة عبر ملايين السنين من دون توقف. لهذا يكون تقليدها على الأرض بالغًا الصعوبة، ولكن البحوث العلمية لإنتاج مفاعل اندماج نظائر الهيدروجين لإنتاج الطاقة في تقدم.

15-1 الانشطار النووي.

تعمل مفاعلات القوى التي تولد الكهرباء بطريقة الانشطار النووي. وهي تستخدم اليورانيوم وما ينتج منه من البلوتونوم كوقود نووي، كما أن استخدام الثوريوم-233 من الممكن أيضا حيث يمكن انشطار أنويته عن امتصاصها نيوترونات. وتصنف مفاعلات الانشطار النووي إلى نوعين من حيث طاقة النيوترونات المستخدمة فيها لاستمرارية التفاعل المتسلسل:

١_مفاعلات نيوترونات حرارية بطيئة (بالإنجليزية: Thermal reactor) وهي الأنواع الغالبة، تهدأ فيها سرعات النيوترونات لتصبح مناسبة لتفاعلها مع أنوية اليورانيوم أو البلوتونيوم. تحوي تلك المفاعلات مهدئات للنيوترونات وهي مواد تهديء من سرعة النيوترونات، مثل الماء فهو يهديء من سرعة النيوترونات. تلك النيوترونات هادئة السرعة تتفاعل مع اليورانيوم-235 والبلوتونيوم-239 وكذلك مع البلوتونيوم-241، واما تفاعلها مع أنوية اليورانيوم-238 فيكون أقل من تفاعل النيوترونات السريعة معه النيوترونات السريعة هي التي تتولد أصلا من الانشطار. وتهدئتها في الماء مثلا يجعلها تتفاعل مع أنوية اليورانيوم-235 والبلوتونيوم -239 فتنشطر تلك الأنوية وتطلق حرارة. النيوترونات البطيئة تتفاعل مع اليورانوم-235 فينشطر، ويقل تفاعلها مع أغلبية اليورانيوم-238.

تنتقل الحرارة الناتجة من التفاعل إلى ماء التهدئة فيسخن تحت ضغط عالي مما يرفع من درجة غليان الماء. يوجد الوقود النووي والماء المهديء في خزان المفاعل (الغلاية)، بالإضافة إلى محسات وأجهزة للتحكم في سير التفاعل. يحيط بخزان المفاعل – الذي يبلغ سمك جداره 12 سنتيمتر من الفولاذ – ويحيط به مانع خرساني سميك لحجب الإشعاعات عن العاملين، بالإضافة إلى المبنى الخرساني للمفاعل من الخارج، يصل سمك جدرانه 5و1 متر.

2_مفاعل النيوترونات السريعة (بالإنجليزية: Fast neutron reactor) وهي مفاعلات لا يكون فيها مهديء لسرعة النيوترونات بصفة أساسية، أو يكون الموجود من المهديء قليلا. ويلزم لاستمرار التفاعل هنا بين النيوترونات السريعة وأنوية اليورانيوم أن يكون اليورانيوم مخصبا بنسبة عالية (نحو 20% من اليورانيوم-235، وتتفاعل النيوترونات السريعة مع اليورانيوم-238 الذي يشكل أغلبية اليورانيوم – وتنتج الطاقة. ميزة مفاعل النيوترونات السريعة هو أنه ينتج مواد مشعة أقل من مفاعل النيوترونات البطيئة - أي تنتج نفايات مشعة أقل بسبب سرعة النيوترونات.[14]

ولكن مفاعلات النيوترونات السريعة تكلف كثيرا، بالتالي يكون ثمن الكهرباء منها عاليا بالمقارنة بإنتاج الكهرباء في مفاعل النيوترونات البطيئة. لهذا فمعظم مفاعلات القوى من نوع مفاعلات النيوترونات الحرارية البطيئة. وتستغل بعض السفن الحربية الروسية مفاعل النيوترونات السريعة لتحركها. كما يقوم الفيزيائيون بتطوير مفاعل النيوترونات السريعة لإنتاج وقود نووي – مفاعل استنسال سريع – وهو يمثل الجيل الرابع من مفاعلات القوى. مفاعلات الجيل الرابع تمثل مفاعلا ينتج الطاقة وفي نفس الوقت ينتج وقودا جديدا في هيئة بلوتونيوم-239 من اليورانيوم-238 يمكن تدويره.

2-15 إندماج النووي.

مفاعل الاندماج النووي مثل توكاماك هو تقنية تجريبية، وهو يستخدم أساسا الهيدروجين الثقيل كوقود. ولا يزال غير ممكنا استغلاله في إنتاج الطاقة ؛ إذ أن التفاعل حتى الآن لا يستمر لفترة طويلة بل ينقطع الاندماج النووي بعد جزء من الثانية. يحاول العلماء مد فترة التفاعل عن طريق استخدام تقنيات ضخمة مستحدثة، ويوجد منه نوع يسمى Farnsworth-Hirsch fusor يستخدم لإنتاج فيض نيوترونات تستخدم في البحث العلمي، وليس لإنتاج الطاقة الكهربائية.

16-1 المشاكل وتدوير المواد في المفاعلات النووية (problems and rotation Materials Nuclear):

المشكلة الكبرى تكمن في كيفية التخلص من المخلفات النووية الناتجة في المفاعلات النووية نظرا لشدة الإشعاعات المؤينة النفاذة الضارة التي تنتج منها. وعادة تخزن وحدات وقود اليورانيوم المستهلك في احواض مائية كبيرة لمدة عشرات السنين لغرض تخفيض إشعاعها النووي إلى حد يسهل معاملتها صناعيا وكيماويا بعد ذلك ؛ فالمواد المشعة ينخفض شدة إشعاعها ذاتيا مع الوقت حيث لها خاصية التحلل الإشعاعي وتوصف المواد المشعة بأن لها عمر النصف. يمكن اختيار طريقة من بين طريقتين لمعاملتها: أما تجهيزها وتغليفها بأغلفة سميكة من الخرسانة والفولاذ بمعزل عنها استعدادا لدفنها في الطبقات الجيولوجية العميقة (على عمق 800 إلى 1000 متر) تحت الأرض بعيدا عن السكان؛ وهذا ما يصلح مع النفايات المشعة المتوسطة الإشعاع والضعيفة الإشعاع، أما النفايات المشعة الشديدة الإشعاع فيتم تغليفها في أسطوانات سميكة من الفولاذ (سمك 40 سنتيمتر) قبل دفنها في الطبقات الجيولوجية العميقة. أو الطريقة الأخرى وتتضمن معالجة اليورانيوم المستهلك كيميائيا لفصل البلوتونيوم-239 عن النفايات المشعة (يتكون البلوتونيوم-239 القابل للانشطار في مفاعل اليورانيوم أثناء التشغيل، يستنفذ منه جزء أثناء تشغيل المفاعل ويتبقى جزء آخر يمكن فصله وإعادة استخدامه كوقود نووي). تتم عملية فصل البلوتونيوم-239 عن النفايات كيميائيا بواسطة روبوتات والتحكم فيها عن بعد.

الطريقة لمعالجة اليورانيوم المستهلك أنها طريقة لتدوير المواد النووية لإعادة استخدام البلوتونيوم الذي يمكن الاستفادة منه (تدويره) من خلال العملية الكيميائية لفصله عن النفايات المشعة التي لا يمكن الاستفادة منها. وقد اختارت أنجلترا وفرنسا هذا الطريق لما له من فائدة نحو تدوير المواد النووية وإعادة استخدامها. وتقوم كل من إنجلترا في سيلافيلد Sellafield وفرنسا في لاهاج La Hague بتدوير المواد النووية المستهلكة الناتجة من تشغيل مفاعلاتهم، كما تقومان بتدوير الوقود النووي المستهلك لبعض البلاد مثل اليابان وألمانيا وسويسرا وبلجيكا.

الفصل الثاني

تعتبر الطاقة النووية وقت السلم سالحا ذو حدين فقد تكون لها إيجابيات كثيرة تعود بالنفع لصالح البشرية, كما أنها في نفس الوقت قد تكون أداة مدمرة في بعض الجوانب. هذا ما نريد أن نتطرق إليه في هذا الفصل بإبراز منافع وإيجابيات الطاقة النووية في مختلف مجالات التنمية, ثم نعرج على أهم الأضرار والسلبيات الناتجة عن إستخدام الطاقة النووية السلمية.

1-2 *منافع* الطاقة النووية في الاستخدامات السلمية:

إن البحث في مشاريع الطاقة النووية ليس مغامرة الاستكشاف كل جديد فحسب وإنما هي البحث من أجل الاستفادة القصوى من هذه الطاقة الغير التقليدية في خدمة الإنسانية. إن الأزمات التي عرفها و يعرفها العالم لعبت دورا كبيرا في تسريع عمليات البحث في المجال النووي السلمي خاصة في مجال الطاقة وكمثال على ذلك حرب 1973حينما أعلنت كثير من دول العالم وخاصة منها المتقدمة بالإسراع في تنفيذ برامج تطوير وإستخدام الطاقة الذرية لتحل محل مصادر الطاقة التقليدية. بحيث أصبحت العملية البحثية في حالة اطراد وذلك كلما أطلت الأزمات العالمية برأسها إزداد نشاط الدول في الأبحاث الذرية الخاصة بالاستخدامات السلمية.

وكمثال على أهم الأبحاث في المجال الذري نجد البحث الجاد والمتواصل في مجال توليد الكهرباء, لأن إنتاج كمية صغيرة من الوقود النووي تنتج طاقة هائلة تقدر بملايين أضعاف ما تنتجه كمية مماثلة من الوقود التقليدي فكل رطل من مادة اليورانيوم(235)القابلة لإلنشطار ينتج عن إنشطار ذراتها طاقة تعادل ما ينتجه 03 مليون طن فحم من النوع الجيد [15].

واذا وضعنا في الاعتبار أن التعداد السكاني للعالم سيرتفع من3.6 مليار نسمة إلى1.7 مليار نسمة في بداية الألفية الثالثة لتبين لنا أن استهلاك العالم

من الطاقة بالمعدل الحالي سيؤدي إلى نفاذ الاحتياطي من الوقود التقليدي ورغم الارتفاع الحالي لتكاليف إنتاج الطاقة النووية نسبيا إلا أنها تعتبر من أفضل مصادر الطاقة التقليدية لعدة أسباب أولها أنه يمكن إستخدام الطاقة النووية في إنتاج الطاقة الكهربائية في المناطق المحرومة من أي مصدر تقليدي لتوليد الكهرباء وكذلك في المناطق المتجمدة للتغلب على مشاكل تجمد الوقود التقليدي وتخزينه, كما أنها تشكل ميزة فريدة بالنسبة لتسيير السفن إذ يمكن زيادة سعة السفينة وكفاءتها وعدم الحاجة للتزود المستمر بالوقود وكل ذلك يؤدي إلى خفض أسعار الشحن.

وإذ أعددنا الفوائد فإنها كثيرة وتمتد إلى إزالة ملوث البحر إستخدامها في

الزراعة, وتمتد إلى المجال الصحي إذ أن الإشعاعات الناتجة عن الانشطار النووي

يمكن إستخدامها في الأغراض الطبية لقياس قوة إندفاع الدم وتحديد أماكن الأورام

السرطانية وعلاج هذه الأورام وعلاج الغدة الدرقية إلى غير ذلك من المجالات.

لذلك ليس هناك حل إلا الإسراع في إستخدام الطاقة النووية كبديل أو كمصدر مواز طاقة التقليدية.[16]

و من أجل سبر أغوار فوائد الطاقة النووية يجب تسليط الضوء على أهم المجالات

الحيوية التي تستخدم فيها هذه الطاقة إذ نوردها فيما يلي:

مجال الطاقة وتنمية الموارد المائية:

1-1 مجال الطاقة:

تدل كل المؤشرات على أن العالم في حاجة كبيرة إلى إستهلاك الطاقة خاصة العالم

المتقدم, وبلغة الأرقام يكفي أن نشير على أن دولة كالولايات المتحدة مثال التي تمثل

نسبة 50 %من سكان العالم تستهلك حوالي 25 % من طاقة العالم و بذلك تنتج 22 %من ثاني أكسيد الكربون عالميا.

كما أن الدراسات تشير إلى أن معدل إستهلاك الطاقة سيرتفع بحلول عام 2020 إلى

70 % من إستهلاك الحالي [17].

وبناءا على هذه المؤشرات و الحقائق لا مناص في إيجاد بدائل أخرى إلى جانب مصادر الطاقة التقليدية ولهذا سعت بعض الدول وخاصة منها الدول المتقدمة إلى تكثيف الأعمال البحثية الخاصة بالطاقة النووية وبناء مزيد من المحطات النووية لتوليد الطاقة خاصة الكهربائية منها لسد العجز الذي يسببه التعطش للطاقة والتخفيف من ضغوط الطاقة في المستقبل.

ولهذا نجد دولة مثل فرنسا اتخذت قرارات حاسمة وذلك ببناء ما لا يقل عن 40 محطة نووية من النوع الذي يبرّ د بالماء المضغوط بين عامي 1965_1985 وهي تستمد 70 %من حاجتها من الكهرباء من مصادر نووية كما أنها تعمل على تحديث واستبدال بعض المنشآت التي انتهى عمرها التشغيلي [18].

وإذا قارنا الطاقة النووية مع المحطات الأخرى خاصة تلك التي تعمل بالبترول أو الغاز أو الفحم أو الطاقة المائية أو الشمسية أو طاقة الرياح, نجد أن الطاقة النووية تقدم طاقة رخيصة نسبيا على المدى الطويل ذلك أن عمر المحطة النووية يصل حاليا إلى 40 سنة هذا إذ وضعنا في الحسبان أن المصادر التقليدية قد تنضب مستقبلا [19].

ونظرا للأهمية المحورية للطاقة في حياة الدول والشعوب فقد بذلت جهود دولية

وإقليمية و محلية لتأمين مصادرها صادر الطاقة و توزعت هذه الجهود في محاور رئيسية هي:

_جهود استغلال و تطوير مصادر الطاقة المائية.

_جهود استغلال وتطوير طرق استكشاف الخامات النووية.

_جهود استغلال وتطوير اساليب استخدام الطاقة المتجددة ومصدرها.

_جهود دعم سياسة ربط الشبكات الكهربائية على النطاقين الإقليمي والدولي

لاستغلال الأمثل للطاقة الكهربائية.

جهود لدعم السياسات التكاملية الإقليمية إنشاء مفاعلات توليد الكهرباء [20]

وتهدف هذه الجهود إلى مواجهة العجز في الطاقة بواسطة حلول عملية لعدة أسباب منها بالخصوص أنه:

-تناقص المخزون العالمي من الفحم و قلة موارده في بعض المناطق إضافة إلى ما يسببه من تلوث بيئي خطير كما أن عملية استخراجه باهظة التكاليف

-تناقص مخزون الاحتياطي العالمي من النفط وكذلك ما يسببه من تلوث على البيئة.

- بروز مشكلة نقل المواد الخام من النفط و الفحم وما تتطلبه هذه العملية من توفير ناقلات عمالقة ومستودعات تخزين وموانئ تفريغ.

ولهذا فإن الدافع الرئيسي الذي حرك معظم دول العالم بالاعتماد على الكهرباء النووية على نطاق واسع يعود بالأساس إلى سلاسة نقل المواد النووية و انخفاض تكاليفها مقارنة مع الطاقة المنتجة تقليديا بواسطة الفحم أو الديزل, ولهذا فإن حجم الكمية المطلوبة من اليورانيوم المعتاد رخيص الثمن والمقدرة ب 20 رطلا تنتج 52 مليون (كيلوواط ساعي) من الطاقة الكهربائية وهذا كاف إضاءة مدينة كبيرة لمدة عام كامل كما أن هذه الكمية من الوقود تتجدد باستمرار ويحل محلها بلوتونيوم جديد إثر عملية التوليد تعادل كفاءته اليورانيوم, كما أن تكاليف الصيانة الخاصة بتنظيف قلب المفاعل من الشوائب تكون منعدمة نتيجة الزيادة في الطاقة المنتجة إذ أن هذه الزيادة تغطي تلك التكاليف [21].

2-1 مجال تنمية الموارد المائية:

لا جدال في أن الماء هو العنصر الأساسي في الحياة ومن دونه لا يمكن للحياة أن تستمر. ولأن المياه تغطي أكثر من70 %من سطح الأرض مقارنة باليابسة وهي في معظمها مياه محيطات تمتاز بالملوحة, فتبقى نسبة أقل من المياه العذبة التي ليست بمقدورها توفير الحاجيات المتزايدة للمياه, وكذلك إذا وضعنا في الحسبان أن الجزء الأكبر من اليابسة هو عبارة عن صحاري وأراضي جافة, فإن العلماء كرسوا جهودهم من أجل سد هذا العجز في المياه وذلك في إعذاب المياه المالحة وتطوير الكشف عن مصادر المياه الجوفية وترشيد إستهلاك المياه والإقلال من الفاقد فيها [22] وكان التحاد السوفيتي السباق في مجال إستخدام الطاقة النووية في تنمية الموارد

المائية و تحلية المياه وذلك بإنشاء مفاعل أوبتسك سنة 1954 ثم تبعته بريطانيا

بمفاعل كالدرهول سنة 1956 ,كما أنه على المستوى الدولي قامت الوكالة الدولية

للطاقة الذرية (IAEA)بتنفيذ مشروع التعاون الإقليمي بعنوان النظام المتكامل للتحلية النووية والذي كان من نتائجه الإتفاق بين الصين والمغرب ببناء محطة نووية لتحلية (8000م^3) يوميا[23] ويمكن إستخلاص أهم استخدامات التكنولوجيا النووية في تنمية الموارد المائية في النقاط التالية:

_إستخدام النظائر المشعة في الدراسات الاقتصادية لتتبع مجاري و مصادر المياه

الجوفية في الصحاري و الأراضي القاحلة.

_إستخدام مصادر الأشعة النيترونية لقياس معدلات الرطوبة في الأرض.

_إستخدام النظائر المشعة في تحديد المقننات المائية المثلى اللازمة لري المحصولات الزراعية كما يحقق ترشيد إستخدام مياه الري في الزراعة.

_إستخدام المصادر الإشعاعية لإنتاج بوليمرات صناعة تضاف للتربة الصحراوية لرفع قدرتها على الاحتفاظ بمياه الري.

2-2 أضرار الطاقة النووية في الاستخدامات السلمية:

رغم وجود تلك المنافع فإن هناك وجه آخر يحمل الكثير من الأضرار والأخطار هذا ما يتناوله هذا المبحث بإبراز هذه الأضرار من جهة ومن جهة أخرى

تسليط الضوء على مدى إهتمام القانون الدولي بهذه المشكلة.

2-1 التلوث الاشعاعي.

قد تتحول الطاقة النووية إلى سالح فتاك يقضي على الأخضر واليابس إذا ما أسرف

الإنسان في إستخدام الإشعاعات النووية دون ضوابط محددة.

وفي البداية يجب الإشارة إلى بعض المفاهيم العلمية لمفهوم التلوث بالإشعاعات

النووية, فقد تعددت التعاريف العلمية للإشعاع النووي, فقال بعضهم "إنه ظاهرة فيزيائية تحدث في الذرات غير مستقرة العناصر, وفيه تفقد النواة الذرية بعض جسيماتها و تتحول ذرة العنصر إلى عنصر آخر و إلى نظير آخر من العنصر ذاته".

وقال آخرون عنه "الإشعاع النووي ما هو إلا طاقة أو جسيمات تتحرر من نواة الذرة

نتيجة لحالة من عدم إستقرار تكون عليها النواة" وعرفه البعض بأنه: "طاقة متحركة في صورة موجات كهرومغناطيسية أو جسيمات تتحرك بسرعة عالية جّدا...ولها القدرة على تغيير الحالة الطبيعية لذرات الأجسام فتحولها إلى ذرات مشحونة بشحنة كهربائية

أي تؤينها" وعرفه البعض الآخر على أنه : "الزيادة في معدل النشاط الإشعاعي عن

الحدود المسموح بها علميا بما يؤثر على عناصر الطبيعة من ماء وهواء وتربة, ويضر بحياة الإنسان"

والملاحظ على التعريف الاخير, أنه يشير بدقة إلى مفهوم الإشعاع النووي من

الناحية العلمية بقدر يحاول صاحبه أن يبين الآثار الضارة التي يحدثها الإشعاع النووي كملوث للمحيط البيئي وما يترتب عن ذلك من مسؤولية.

ومن مجموع ما سبق يتضح لنا أن الإشعاع النووي هو تلك الطاقة المتحركة الصادرة عن نواة في حالة عدم إستقرار لها القدرة على إختراق الأجسام التي تعترض سبيلها فتحدث خلال في مكوناتها الطبيعية, فتختل بها العمليات البيولوجية والكيميائية نتيجة إختراق الإشعاع النووي لهذه الأجسام [24].

2-2مصادر التلوث الإشعاع:

يصدر الإشعاع النووي عن مصدرين مختلفين, إما مصادر طبيعية, وهذا النوع من

الإشعاع لا دخل للإنسان فيه ولا يتحمل أي مسؤولية عنه, أما المصدر الثاني فهو

المصادر الصناعية وهذا النوع من الإشعاع النووي يتسبب في حدوثه الإنسان ويتحمل المسؤولية كاملة عنه. هذا ما ينتج عنه أضرار على المستوى البيئي وبذلك صحة الكائنات الحية بما فيها الإنسان.[25].

ولهذا سوف نشير إلى هذين المصدرين وذلك فيما يلي:

2-1 المصادر الطبيعية:

1-الأشعة الكونية: تعتبر الأشعة الكونية أحد مصادر الإشعاع النووي إن لم تكن

أهمها, وتصلنا هذه الأشعة من الشمس ومن داخل وخارج مجرتنا و تبلغ نسبة

التعرض لها بالنسبة للأفراد حوالي 200مللي ريم كل سنة على الأقل وتشتمل

الأشعة الكونية على بروتونات جسيمات ألفا, وتمر هذه الإشعاعات عبر الغافل

الجوي الذي يلعب دورا كبيرا في التخفيف من بعض الإشعاعات الكونية وتزداد

الجرعات كلما ارتفع الإنسان عن مستوى سطح البحر

كما تزداد الجرعة الإشعاعية عند القطبين وتقل كلما اتجهنا نحو خط الاستواء [26].

2_إشعاعات القشرة الأرضية: تحتوي صخور القشرة الأرضية والتربة على الكثير من المواد المشعة التي تعطي للجنس البشري على وجه الخصوص جرعة إشعاعية تزيد أحيانا عن الجرعة الناتجة عن الإشعاعات الكونية ويختلف تركيز هذه العناصر في التربة باختلاف أنواعها, حيث يزداد تركيزها في الصخور الجرانيتية ويقل في الصخور البازلتية والرسوبية والرملية وتقدر الجرعة الإشعاعية الواصلة للإنسان من هذه المواد المشعة ما بين 100 و 300 مللي رونتجين (١) Roentge)في السنة.

ومن أمثلة المواد المشعة الموجودة بالقشرة الأرضية نجد:

_ اليورانيوم و الثوريوم: يوجد اليورانيوم بكميات أكبر في الطبيعة لكنه أقل انتشارا من الثوريوم.

_ البوتاسيوم: وهو شديد الانتشار في الطبيعة مكونا نسبة ثابتة مع البوتاسيوم غير المشع, وهو موجود في حجارة المباني والتربة وغيرها.

_ مواد مشعة قريبة من سطح الأرض وهي مواد غازية مشعة ومن أمثلتها غاز الكربون والرادون والثورون, ويعتبر الكربون العنصر الأساسي لكل أنواع الحياة على سطح الأرض ويدخل في جميع العمليات البيولوجية والجيوكيميائية للكائنات الحية, ويقوم الإنسان باستنشاق هذه الغازات المشعة عند استنشاق الهواء فتؤثر في جسمه من الداخل وخاصة نخاع العظام والرئتين.

_الإشعاع الطبيعي داخل جسم الإنسان: الإنسان في تركيبته الفيزيائية يحتوي على نظائر مشعة, فهو يحتوي على عنصر البوتاسيوم40 والكربون 14 ويشكل عنصر البوتاسيوم 40 أهمية أكبر كونه تصدر عنه أشعة بيتا وأشعة جاما وهي أشعة مرتفعة الطاقة والعمر النصفي للعنصر المشع, فجسم الإنسان الذي يزن 70 كلغ في المتوسط يحتوي على حوالي 140 جرام من البوتاسيوم.

---

(١) الرونتجين Roentgenهو وحدة قياس الجرعة التعارضية من الأشعة العامية أو النسبية.

يقدر تركيز الجزء المشع فيه بحوال 0.1 كوري أشعة ببيتا و0.01 مللي كوري (٢) أشعة جاما, والجرعة الواصلة للجسم هي 20 مللي رونتجين في السنة. وعنصر الكربون يعتبر العنصر الأساسي لكل أنواع الحياة على سطح الأرض. ويدخل في جميع العمليات البيولوجية والجيوكيمائية ويصل تركيزه في الجسم إلى حوالي 0.01 مللي كوري, ولكنه يعطي جرعة إشعاعية أقل من البوتاسيوم 40 بعشرين مرة لأن طاقة أشعة بيتا به أقل [27].

2-2 المصادر الصناعية:

تعتبر المصادر الصناعية للإشعاع النووي من طبع الإنسان عكس المصادر الطبيعية المشعة التي لا دخل للإنسان فيها وهذه المصادر متنوعة ونخص بالذكر:

المصادر الإشعاعية للأغراض الطبية: تستعمل بعض المواد المشعة في مجال الطب الحديث إما للكشف عن المرض أو عالجه, فقد استخدم الإنسان المصادر الإشعاعية لأغراض طبية قبل إكتشاف النشاط الإشعاعي للذرة بسنوات طويلة, ففي أواخر سنة 1895 اكتشفت الأشعة النسبية, وفي بداية عام 1896 ابتدأ إستخدامها في مجالات الصناعة والطب. وبعد بداية عصر الذرة, وارتفاع معدل التطور في العلوم المختلفة ازدادت هذه الاستخدامات وتنوعت, ففي مجال الطب يمكن استعمال المواد المشعة كما أسلفنا سابقا فيما يلي:

التشخيص والعالج بالأشعة النسبية:

_العلاج الاشعاعي بالمصادر المشعة المغلقة مثل إبر الراديوم ووحدات الكوبالت 60.

---

(٢) الكوري هي وحده قياس النشاط الإشعاعيّ.

_التشخيص والعلاج بحقن المواد المشعة مثل اليود 131 والفوسفور 32 والذهب 198,ومن خلال ذلك, يتضح الجانب الإنساني الاستعمالات الذرة في التشخيص والعلاج لكثير من الأمراض المستعصية مثل أمراض السرطانات المختلفة واختلال عمل الغدد وأمراض الدم ولكن إلى جانب ذلك فإن العاملين بالمصحات التي تستخدم المواد المشعة في تشخيص الأمراض وعلاجها من راديولوجيون وأطباء أسنان وفيزيائيين طبيين وكذلك المرضى أنفسهم يتعرضون لخطر هذه الأشعة وخاصة الأشعة النسبية.

الخـــــاتـــــمـــــــــة

تعد الطاقة هامه لدى الإنسان والمجتمع بشكل عام. حيث تساهم الطاقة في تلبية احتياجات المجتمع، كون الطاقة تتحول من شكل لآخر لتحقق فائدة لدى المجتمع في الحصول على احتياجات المتعددة لذلك يعد مفهوم الطاقة من مفاهيم التي بدونها لا توجد حياة.

{ المصادر والمراجع }

[1]FuKushima ".(2011 June 27) (Tomoko Yamazaki and Shunichi Ozasa

Retiree Leads Anti-Nuclear Shareholders at Tepco Annual Meeting ."

Bloomberg.14-10-2014 مؤرشف من الأصل في.

[2] Richard Tilghman Weidner (8/6/2021), "physics", britannica, Retrieved 16/6/2021. Edited.

[3] Mohammad W. Ahmed (31/5/2021), "Nuclear physics", nature, Retrieved 16/6/2021. Edited.

[4] Newman, Jay (2008). Physics of the Life Sciences. Springer. P. 652. ISBN 978-0-387-77258-5.

[5]" DOE Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory" (PDF). US Department of Energy. Archived from the original (PDF) on 23 April 2008. Retrieved 24 September 2008.

[6] " Reactor Protection & Engineered Safety Feature Systems". The Nuclear Tourist25-09-2008 اطلع عليه بتاريخ 22-08-2018. مؤرشف من الأصل في .

[7] " PRIS – Home". Pris.iaea.org.26-01-2021 مؤرشف من الأصل في .

[8] " RRDB Search". Nucleus.iaea.org.11-04-2022 مؤرشف من الأصل في .

[9]Oldekop، W. (1982)، "Electricity and Heat from Thermal Nuclear Reactors"، Primary Energy، Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg ،91–66 ص. ، doi:10.1007/978-3-642-68444-9_5، ISBN 978-3-540-11307-2 ، مؤرشف من الأصل في 05-06-2018، اطلع عليه بتاريخ 02-02-2021

[10] "Bioenergy Conversion Factors". Bioenergy.ornl.gov. Archived from the original on 27 September 2011. Retrieved 18 March 2011

[11] Bernstein, Jeremy (2008). Nuclear Weapons: What You Need to Know. Cambridge University Press. P. 312. ISBN 978-0-521-88408-2. Retrieved

[12] Nuclear Reactor Analysis, John Wiley & Sons Canada, Ltd

[13] Alexander Glaser (6 " .(2005 نوفمبرAbout the Enrichment Limit for Research Reactor Conversion : Why 20%?" (PDF). Princeton University. مؤرشف من الأصل(PDF) 18-04-2014 اطلع عليه بتاريخ 17-05-2018. في

[14] Golubev، V. I ؛.Dolgov، V. V ؛.Dulin، V. A ؛.Zvonarev، A. V ؛.Smetanin، É. Y ؛.Kochetkov، L. A ؛.Korobeinikov، V. V ؛.Liforov، V. G ؛.Manturov، G. N ؛. Matveenko، I. P ؛.Tsibulya، A. M. (1993). "Fast-reactor actinoid transmutation". Atomic Energy. 74: 83. Doi:10.1007/BF00750983

[15] د. سمير محمد فاضل, المسؤولية عن الأضرار الناتجة عن إستخدام الطاقة

النووية وقت السلم عالم الكتب.القاهرة سنة 2774ص27.

[16] د. سمير محمد فاضل – مرجع سابق –ص18.

[17] محمد عبد هلال محمد نعمان ضمانات إستخدام الطاقة النووية في الأغراض السلمية, دراسة قانونية في ضوء القواعد والوثائق الدولية دون دار نشر – صنعاء2001- ص 15 .

[18] ديفيد هويل وكارول نخلة - مأزق الطاقة و الحلول البديلة. ترجمة أمين الأيوبي, الدار العربية للعلوم ناشرون, بيروت 2008 ص238.

[19] عبد القادر رزيق المخادمي- سباق التسلح الدولي الهواجس والطموحات والمصالح- ديوان المطبوعات الجامعية –الجزائر 4010- ص 157 .

[20] د. حامد رشدي القاضي, التأثيرات الاقتصادية والاجتماعية الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية في الدول العربية, محاضرة عامة منشورة خلال المؤتمر العربي الثاني الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية, منشورات الهيئة العربية للطاقة الذرية الجزء الأول القاهرة 1995 ص 50.

[21] د. حامد رشدي القاضي – مرجع سابق – ص 52,53.

[22] جيرالدونت الطاقة الذرية و إستعمالها في السلم, ترجمة: محمد الشحات, مراجعة: د. إبراهيم حلمي عبد الرحمن, العالمية – للطبع والنشر, سلسلة (1000 كتاب) القاهرة 1956 ص 101 .

[23] عبد القادر رزيق المخادمي – مرجع سابق – ص 170 .

[24] د. علي سعيدان – حماية البيئة من التلوث بالمواد الإشعاعية والكيماوية في القانون الجزائري- دار الخلدونية- الجزائر – ط 2008ص 27,28 .

[25] د. علي سعيدان – نفس المرجع- ص 29 .

[26]هدى حامد قشقوش, التلوث بالإشعاع النووي في نطاق القانون الجنائي, دار النهضة العربية, سنة 1997 ص 19.

[27] د. علي سعيدان – مرجع سابق ص 31,32.

[28] "Nuclear Fusion Power". 2009-09. مؤرشف من الأصل في 24 فبراير 2013.

[29]Newman, Jay (2008). Physics of the Life Sciences. Springer. P. 652. ISBN 978-0-387-77258-5.

[30]Nuclear power plants, world-wide نسخة محفوظة 19 أغسطس 2017 على موقع واي باك مشين.

[31] "DOE Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory" (PDF). US Department of Energy. Archived from the original (PDF) on 23 April 2008. Retrieved 24 September 2008.

[32] "Reactor Protection & Engineered Safety Feature Systems". The Nuclear Tourist. مؤرشف من الأصل في 22-08-2018. اطلع عليه بتاريخ 25-09-2008.

[33] "PRIS – Home". Pris.iaea.org.26-01-2021. مؤرشف من الأصل في

[34] "RRDB Search". Nucleus.iaea.org-04-2022. مؤرشف من الأصل في 11.

[35]Oldekop، W. (1982)، "Electricity and Heat from Thermal Nuclear Reactors"، Primary Energy، Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg، doi:10.1007/978-3-642-68444-9_5، ISBN 978-3-540-11307-2، ص. 66–91، مؤرشف من الأصل في 05-06-2018، اطلع عليه بتاريخ 02-02-2021

المحيط