

الفصل العاشر

الفيزياء الصحية

في المفاعل النووي

obeikandi.com

الفصل العاشر

الفيزياء الصحية في المفاعل النووي

1.10 مقدمة :

هياً اكتشف الانشطار النووي عام 1938م أساس مصدر جديد للطاقة يفوق مجموع المخزون العالمي من الوقود التقليدي⁽¹⁾. وكان نمو الطاقة النووية سريعاً؛ لأن تشغيل أول مفاعل في ساحة للعبة الإسكواش⁽²⁾ حوّلت لهذا الغرض في شيكاغو كان عام 1942م من قبل العالم أرنكو فيرمي⁽³⁾، ورفاقه وأعقب ذلك تطور سريع لمخططات الطاقة النووية في الستينيات والسبعينيات الميلادية. وقد تباطأت في الثمانينيات والتسعينيات الميلادية، ومعظم المخططات الأولى أوقفت ولكن الطاقة النووية لا تزال تسد قسماً ملموساً من متطلبات الطاقة في معظم الدول المتقدمة في العالم، ولكن محاسن المفاعل النووي بوصفها مصدراً للطاقة قد قابلها عدد من المشكلات الخاصة التي من ضمنها:

- (1) حماية عامل التشغيل وعامل الصيانة.
 - (2) التعامل الأمين والتخلص من الكميات الهائلة من المواد المشعة المتولدة أو تخزينها.
 - (3) محاولة الوصول إلى درجة منخفضة ومقبولة من حيث الأخطار والأضرار للمواطنين، نتيجة الإطلاق المحتمل للمواد المشعة في حالة وقوع حادث في المفاعل.
- ويمكن التغلب على هذه المشكلات جميعها، ومن المتفق عليه عموماً أن لصناعة الطاقة النووية سجل أمان جيد، وهناك عدد قليل من الاستثناءات التي تمت مناقشتها في الفصل 16.

(1) المقصود بالوقود التقليدي: هو النفط، والفحم الحجري، والغاز الطبيعي.

(2) لعبة الإسكواش: لعبة شبيهة بكرة اليد والمنضدة (التنس).

(3) فيرمي: عالم إيطالي ولد عام 1901م، وانتقل إلى أمريكا، وشارك في صناعة القنبلة النووية، وحصل على جائزة نوبل عام 1938م، عن بحثه في "تفاعلات النيوترونات البطيئة" وتوفي عام 1954م.

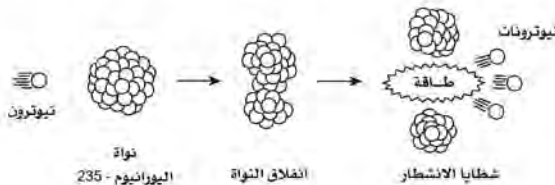
ومن أجل فهم الأخطار المصاحبة للمفاعلات النووية، من الضروري الإلمام بأساسيات الانشطار النووي وتكنولوجيا المفاعل، وهذا ما سنعرض له في هذا الفصل. وسنتطرق بعد ذلك للأخطار الإشعاعية المصاحبة لتشغيل المفاعلات النووية.

2.10 الانشطار:

1-2-10 عملية الانشطار:

الانشطار هو انقسام النواة إلى قسمين متساويين تقريباً تعرف بشظايا الانشطار، وقد وجد أن أنواعاً معينة من النوى الثقيلة تنشط تلقائياً بمعدل بطيء نسبياً، مثل اليورانيوم والثوريوم، وهناك نوى أخرى يمكن شطرها بإعطائها بعض الطاقة كقذفها بالنيوترونات. والمواد التي يمكن شطرها بهذه الطريقة تدعى المواد الانشطارية، وعملية الانشطار تؤدي إلى تحرير طاقة تكون أساساً على شكل طاقة حركية لشظايا الانشطار، وهذه الطاقة تتحول سريعاً إلى طاقة حرارية ترفع درجة حرارة مواد الوقود. وهناك نظير واحد فقط قابل للانشطار بدرجة ملحوظة من المواد الموجودة طبيعياً وهو اليورانيوم - 235 (^{235}U) وهذا النظير يكون 0.7 في المئة فقط من اليورانيوم الطبيعي، أما الباقي وهو 99.3 في المئة فهو يورانيوم - 238.

من المميزات الأساسية المهمة للانشطار أن شظايا الانشطار غير مستقرة، ولذلك فهي تطلق نيوترونات - عادة بين 2 و 4 في كل انشطار - (شكل 1-10) ومعظم هذه النيوترونات غالباً ما تنطلق آنياً، وتدعى النيوترونات الآلية، وبعضها الآخر ينطلق بعد ثوانٍ أو حتى بعد دقائق من حدوث الانشطار، وتدعى النيوترونات المتأخرة.



شكل (1-10) الانشطار

إن انطلاق النيوترونات في عملية الانشطار ينطوي على عدد من العواقب:

أولاً: يمكن من قيام تفاعل متسلسل.

ثانياً: إن النيوترونات التي تؤسر من قبل وقود اليورانيوم تؤدي إلى إنتاج عناصر ما فوق اليورانيوم منها البلوتونيوم (انظر البند 10-2-4).

ثالثاً: إن النيوترونات التي تؤسر من قبل هيكل محطة المفاعل النووي والمواد الأخرى تؤدي إلى جعل هذه المواد مشعة، (انظر البند 10-2-5).

10-2-2 التفاعلات المتسلسلة والكتل الحرجة:

قد تؤدي النيوترونات المتولدة إلى انشطارات أخرى مع إطلاق نيوترونات جديدة، ما يؤدي إلى إمكان الحصول على تفاعل متسلسل، وفي الواقع تهرب بعض النيوترونات من وحدة المفاعل وبعضها يؤسر في تفاعلات غير انشطارية، ويقلل من خسارة النيوترونات المأسورة في المفاعل بالحرص على عدم استخدام مواد ذات مقطع أسر عال في قلب المفاعل. ومع هذا فلا بد من بعض الخسارة، فحتى مواد الوقود يمكنها أسر النيوترونات دون أن تنشطر، وبزيادة حجم قلب المفاعل يمكن التقليل من النيوترونات الهاربة إلى نسبة منخفضة تمكن من التفاعل المتسلسل. فإذا ما كان القلب صغيراً جداً فيسهل هرب النيوترونات عندئذ. أما إذا كان القلب كبيراً فيتطلب من النيوترون قطع مسافة إضافية، ما يزيد من احتمال إحداث الانشطار. وهناك طريقة أخرى لتقليل الهرب، وذلك بوضع عاكس من مواد خفيفة حول القلب تعكس النيوترونات الهاربة ثانية إلى القلب.

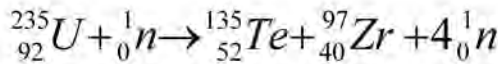
لو افترضنا كتلة من مادة انشطارية تولد 2.3 نيوترون كمتوسط في كل انشطار، فإذا كان عدد النيوترونات المفقودة بالهرب والأسر هو 1.3 نيوترون في المتوسط فيبقى هناك نيوترون واحد متوافر لإحداث انشطار آخر، وهذا يؤدي من ثم إلى تفاعل متسلسل مستديم بنفسه، ويكون معدل الانشطار ثابتاً، ويسمى هذا النظام حرجاً. أما إذا كان معدل خسارة النيوترونات هو 1.31 نيوترون في كل انشطار فهذا يعني أن

النيوترونات المتبقية للانشطار هي $2.30 - 1.31 = 0.99$ نيوترون، ويدعى هذا النظام **تحت الحرج**، حيث يتناقص معدل الانشطار فيه، والعكس فيما إذا كانت الخسارة هي 1.29 نيوترون للانشطار، فيبقى 1.01 نيوترون، وهذا ما يؤدي إلى نظام فوق الحرج حيث يزداد فيه معدل الانشطار. ولهذا فإن هناك أصغر حجم للقلب لكل نوع من أنواع المفاعلات لا يكون فيه النظام حرجاً إذا ما قل الحجم عن ذلك، وبعبارة أخرى هناك أقل كتلة من الوقود ضرورية لحصول تفاعل متسلسل، وهي ما تدعى **أقل كتلة حرجية**. فمثلاً يمكن في الأساس عمل سلاح نووي مكون من قطعتين من المادة الانشطارية كل واحد منهما أكبر بقليل من نصف الكتلة الحرجية، ويفجر هذا السلاح بحلب النصفين بسرعة إلى بعضهما بعضاً؛ لإعطاء كتلة فوق الحرجية مؤدية إلى زيادة معدل الطاقة المتحررة بصورة سريعة جداً إلى قيمة هائلة. ومن حسن الحظ أن هذا ما يصعب إنجازه عملياً.

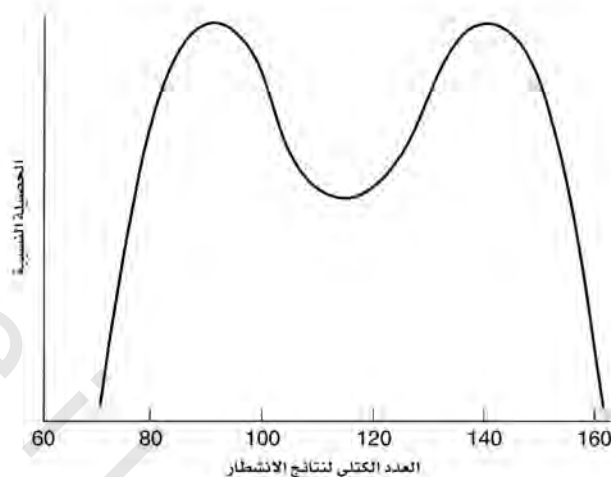
واحتمالية تكون الكتلة الحرجية نتيجة وضع المواد الانشطارية بكميات كافية، له أهمية كبيرة في تصميم وتشغيل المحطات التي تعالج أو تنقل أو تخزن هذه المواد، فمن البدهي أن يكون من الأهمية بمكان التأكد من عدم حدوث الكتلة الحرجية، ويمكن تحقيق هذا الهدف عادة بالتصميم الدقيق للمرافق، وفي بعض الأحيان يكون ذلك عن طريق إجراءات التشغيل. وفي الفصل 16 مناقشة أوسع لهذا الأمر.

10-2-3 نواتج الانشطار:

يمكن أن يحدث انشطار ذرة المادة بطرق عدة، ففي الانشطار الأكثر احتمالاً للذرة الثقيلة تنقسم إلى شطيتين بكتلتين مقدارهما نحو 97 و 145، ومثال على ذلك:

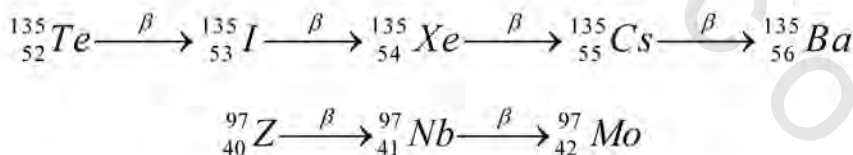


إن توزيع العدد الكتلي لنواتج الانشطار موضح في الشكل (10-2).



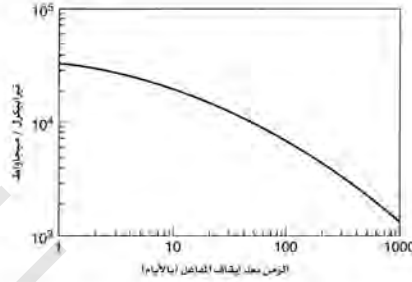
شكل (10-2) الحصيلة النسبية لنواتج الانشطار

وعملية الانشطار تنتج نحو 300 نويدة مختلفة معظمها يحوي فائضاً من النيوترونات، وتحلل بإطلاق جسيمات بيتا مارة بسلسلة من النويدات المشعة. ففي المثال السابق يتحلل كل من الثوريوم - 135 والزركونيوم - 97 بإطلاق جسيمات بيتا، حتى يصل كل واحد منهما إلى نويدة مستقرة:



ويمكن ملاحظة أن استغلال الانشطار النووي لإنتاج الطاقة يؤدي إلى تكون المئات من أنواع مختلفة من نواتج الانشطار المشعة في داخل الوقود ذوات أعمار الأنصاف المتباينة التي تتراوح ما بين جزء من الثانية إلى سنوات عدة، ويزداد تراكم نواتج الانشطار خلال مدة التشعيع.

يظهر الشكل (10-3) نواتج الانشطار المتراكمة بالبكريل وتحللها خلال 1000 يوم في وقود قد ولد ميجاواط واحد من الحرارة بصورة متجانسة مدة 2000 يوم من التشعيع.

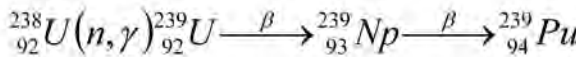


شكل (10-3) نواتج الانشطار المشعة لبيتا والمزاحة

إن نواتج الانشطار من النويدات المختلفة لها صفات فيزيائية وكيميائية متباينة كثيراً، ولهذا فهي مختلفة في شدة سميتها الإشعاعية بصورة كبيرة. ولمنع نواتج الانشطار من الهروب يوضع الوقود في مادة أخرى لها صفات مناسبة تعرف ببطانة الوقود.

10-2-4 عناصر ما فوق اليورانيوم:

يمكن أن تأسر ذرات الوقود النيوترونات في تفاعلات غير انشطارية، كما مر بنا سابقاً. إن تفاعلات الأسر المتتالية هذه مع تحللات بيتا تؤدي إلى تولد عناصر ما فوق اليورانيوم في الوقود، ومن هذه التفاعلات ذات الأهمية الخاصة أسر النيوترونات من قبل اليورانيوم - ^{238}U الذي ينتج عنه يورانيوم - ^{239}U الذي يتحلل بسرعة بإطلاق جسيم بيتا ليتحول إلى نبتونيوم - ^{239}Np ، وبعدها يتحول الأخير إلى بلوتونيوم - ^{239}Pu .



وهذه العملية ذات أهمية كبيرة؛ لأنها توفر طريقة لتحويل نسبة كبيرة من اليورانيوم - ^{238}U غير القابل للانشطار إلى البلوتونيوم - ^{239}Pu القابل

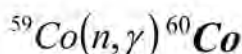
للاضطراب، ولكن للبلوتونيوم - 239 مساوئ، إذ إن له عمر نصف طويلاً جداً ($t_{1/2} = 24300$ سنة) ويطلق جسيمات ألفا، وهو شديد السمية الإشعاعية بعكس اليورانيوم.

وعمليات الأسر وتحلل أشعة بيتا الإضافي تقود إلى تولد نويدات الأمريسيوم (Am) والكوريوم (Cm).

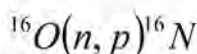
10-2-5 نواتج التنشيط الإشعاعي:

يؤدي أسر النيوترونات من قبل المواد المكونة لهيكل ومبرد المفاعل إلى تولد فضائل عدة من نواتج التنشيط الإشعاعي، ففي القطع الفولاذية يتحول نظير الحديد المستقر - 58 (^{58}Fe) بعد أسره نيوترون إلى الحديد - 59 (^{59}Fe) الذي يتحلل بإطلاقه جسيم بيتا إلى الكوبلت - 59 (^{59}Co). وعمر النصف للحديد - 59 (^{59}Fe) هو 45 يوماً.

وتنشيط آثار العناصر في المواد مهم في حالات عدة بسبب توافق محدد للخصائص النووية. وكل أنواع الفولاذ مثلاً يحوي الكوبلت - 59 بنسب لا تتجاوز مئات عدده من الأجزاء بالمليون، فينشط النظير المستقر الكوبلت - 59 (^{59}Co) بالتفاعل الآتي:



والكوبلت - 60 له عمر نصف طويل نسبياً (5.22 سنة) ويطلق إضافة إلى جسيم بيتا المنخفض الطاقة فوتونين بطاقة عالية من أشعة جاما في كل تحلل. هناك تفاعل مهم للأكسجين الداخل في تركيب المبرد في كل من المفاعلات المبردة بالماء أو الغاز وهو:

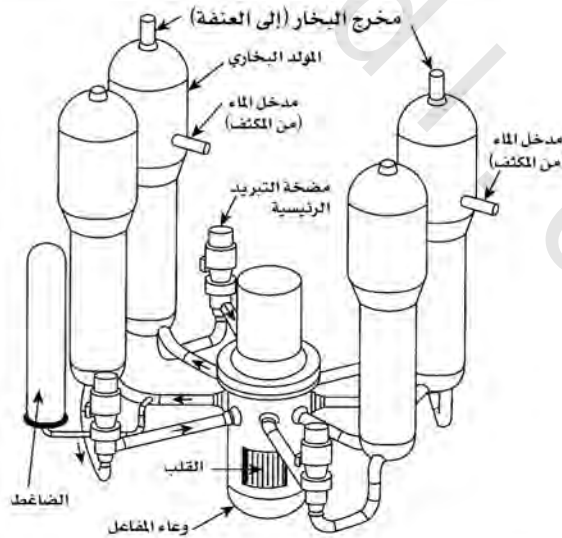


ومع أن عمر النصف للنيوتروجين قصير جداً وهو 7.2 ثانية، ولكن له تأثيراً كبيراً في تحديد الحواجز المطلوبة.

10-3 نظام المفاعل:

10-3-1 السمات العامة:

الغالبية العظمى من المفاعلات التجارية لتوليد الطاقة النووية التي تعمل في الوقت الحاضر، أو التي لا تزال تحت الإنشاء في أنحاء العالم هي من نوع مفاعلات الماء الخفيف التي طورت في بادئ الأمر في الولايات المتحدة الأمريكية. وهذه المفاعلات على نوعين: مفاعلات الماء المضغوط (PWR) ومفاعلات الماء المغلي (BWR)، في مفاعلات الماء المضغوط هناك نظام مغلق للماء لنقل الحرارة من قلب المفاعل إلى المرجل (المبادل الحراري) حيث يتولد البخار في دائرة ثانوية لتدوير العنفة (التurbine) (انظر الشكل 10-4)، أما في مفاعلات الماء المغلي فيسمح للماء المار في قلب المفاعل بالغيان ويمرر البخار المتولد مباشرة إلى العنفة (التurbine). ومن الأنواع الأخرى من المفاعلات المبردة بالماء المفاعل الكندي (كندو) الذي يستخدم الماء الثقيل مهدئًا للنيوترونات.



شكل (10-4) التركيب الأساسي في مفاعلات الماء المضغوط

أما في المملكة المتحدة فقد كانت وجهة التطوير مغايرة، ما أدى إلى تصنيع جيلين من المفاعلات المبردة بالغاز: ففي الجيل الأول الذي يدعى مفاعلات مازوكس يحتوي القلب على تركيب كبير جداً من الجرافايت تتخللها قنوات تحوي قضبان وقود اليورانيوم الطبيعي مبطنة بسبيكة من المغنيسيوم وتبرد بغاز ثاني أكسيد الكربون، الذي يمر بمرجل، حيث يتولد البخار كما هي الحال في مفاعل الماء المضغوط. أما الجيل الثاني من مفاعلات المملكة المتحدة فيدعى المفاعلات المتقدمة المبردة بالغاز (AGR)، وقد استخدمت بطانة الوقود في هذه المفاعلات من الفولاذ المقاوم للصدأ من أجل الوصول إلى درجة حرارة تشغيل أعلى. وقد تطلب هذا يورانيوم مخصباً كما هو مناقش في الباب اللاحق. والشكل (10-5) يصور محطة مثالية لمفاعلات مازوكس. ويصور الشكل (10-6) محطة مثالية لمفاعلات الماء المضغوط.

وقد طور نوع آخر من المفاعلات في فرنسا واليابان - بصورة خاصة - وهو المفاعل السريع المنتج (FBR) المبرد بالصوديوم، ويعرف في بعض الأحيان بالمفاعل السريع المنتج المبرد بالمعدن السائل (LMFBR)، إن الفكرة الأساسية لهذا المفاعل السريع هي استخدام وقود البلوتونيوم المستحصل من الوقود المستهلك للمفاعلات الحرارية الذي سيولد فيما بعد كمية كافية من البلوتونيوم تكفي حاجته من الوقود، وذلك بامتصاص اليورانيوم - 238 الموجود داخل وحول قلب المفاعل للنيوترونات، ولكن تطوير المفاعلات السريعة⁽¹⁾ قد تباطأ بشكل كبير نتيجة المشكلات الهندسية الصعبة التي أدت إلى زيادة التكلفة بشكل ملحوظ وبسبب عدم حدوث الندرة المتوقعة لليورانيوم.

ومن الأمور الأكثر حداثة تجدد الاهتمام في المفاعلات المبردة بالغاز المرتفع درجة الحرارة (HTGR)، الذي يستخدم غازاً لتبريد وقود اليورانيوم السيراميكي، وفي أحد التصميمات (المعروفة بمفاعلات Pebble Bed) يتكون الوقود من آلاف عدة من كريات السيراميك يمر خلالها الهليوم لإزالة الحرارة، ودرجة حرارته عند خروجه من قلب المفاعل

(1) يوجد حالياً مفاعل سريع واحد يعمل في روسيا، أما بقية المفاعلات فقد أوقفت عن التشغيل.

أعلى بكثير مما هو في المفاعلات الحالية المبردة بالغاز، لهذا يمكن من الناحية النظرية عمل دائرة مباشرة للعنف، ولكن هذه المفاعلات تشكل تحديات إشعاعية غير مألوفة.

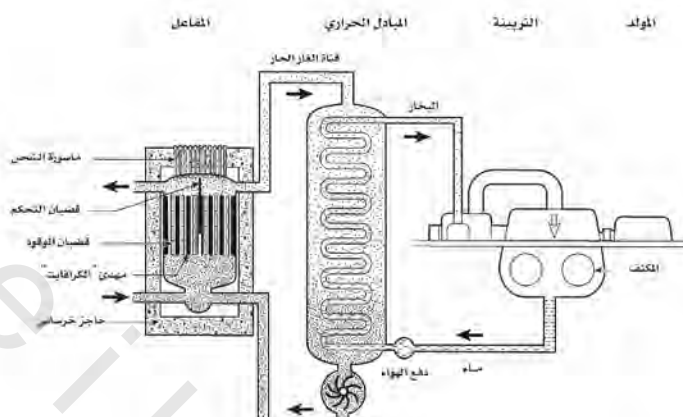
إن السمة الرئيسة لأي مفاعل نووي هي القلب الذي يحوي كلاً من المواد الانشطارية، ووسيلة التحكم في معدل الانشطار، ومهدئ في حالة المفاعلات الحرارية، وليس في حالة المفاعلات السريعة. أما السمات الأخرى الرئيسة فهي: نظام التبريد لإزالة الحرارة المتولدة من الانشطار، والحواجز الواقية (الدروع) من الإشعاع التي تدعى عادة الحواجز الإحيائية (البايولوجية).

وستناقش هذه السمات المختلفة فيما يلي:

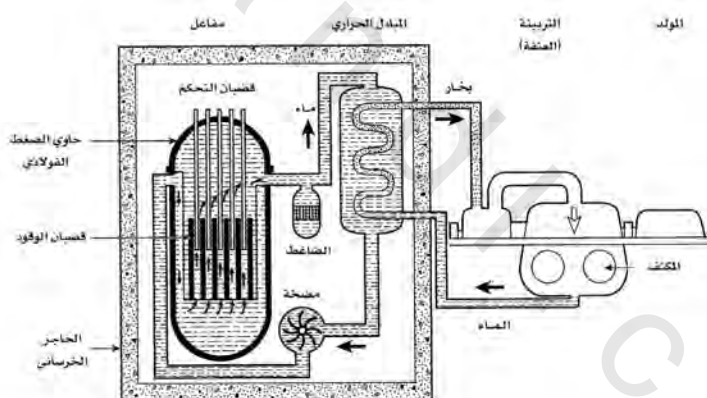
10-3-2 قلب المفاعل النووي ونظام التحكم:

يحتوي قلب المفاعل على قضبان الوقود التي تتركب من مواد انشطارية في خلية للوقود، أو تكون مغطاة بمواد مبطنة تمنع هروب نواتج الانشطار، والوقود المستخدم عادة هو اليورانيوم، ويستخدم في بعض الأحيان البلوتونيوم والثوريوم. يحتوي اليورانيوم الطبيعي على 0.7 بالمائة من نظير اليورانيوم - 235 (^{235}U) وعلى 99.3 بالمائة من اليورانيوم - 238 (^{238}U). إن مفاعلات المكنوكس والكندو تعمل على نحو مقبول باستخدام اليورانيوم الطبيعي. أما في المفاعلات الأخرى، فمن الضروري زيادة نسبة اليورانيوم - 235 بعملية تخصيب.

يقوم المهدئ بتبليطة النيوترونات السريعة المتولدة في الانشطار إلى مستوى الطاقة الحرارية، حيث يزداد عندها احتمال تسببها في إحداث انشطارات جديدة. أما في أنظمة مفاعلات الماء الخفيف، فيقوم الماء بعملية التهدئة والتبريد، أما في أنظمة الغاز المبرد فإن الجرافيت يعمل بوصفه مهدئاً.



شكل (10-5) رسم توضيحي لمفاعل "ماكنوكس" النووي



شكل (10-6) رسم توضيحي لمفاعل الماء المضغوط

تتركب قضبان التحكم من مواد لها مقاطع مستعرضة كبيرة لأسر النيوترونات مثل البورون والكادميوم، ويؤدي رفع قضبان التحكم إلى موضع معين يصبح المفاعل فيها حرجاً، والزيادة في رفعها يؤدي بالمفاعل إلى أن يصبح فوق الحرج، فيزداد بذلك معدل الانشطار، وعند الوصول إلى الطاقة المطلوبة تدخل قضبان التحكم حتى يصبح المفاعل

حرجاً، وبهذا تثبت الطاقة. ويمكن خفض الطاقة بإدخال قضبان الوقود إلى ما تحت الحرج، وإذا ما زاد فيض النيوترونات عن حد معين أو كانت زيادة فيض النيوترونات سريعة جداً تدخل قضبان التحكم آلياً، وهناك في بعض الأحيان قضبان خاصة لوقف المفاعل، وإن هناك أنظمة متعددة أخرى للمراقبة تعطي معلومات تتمكن بها من وقف المفاعل إذا ما حدث خلل ما، فمن هذه الأنظمة مراقبة ارتفاع مستويات أشعة جاما خارج الحاجز الإحيائي، والزيادة الملحوظة في درجة حرارة القلب أو المبرد أو عند توقف دوران المبرد.

10-3 نظام التبريد:

يؤدي الانشطار إلى إطلاق حرارة في داخل الوقود يتبعها ارتفاع في درجة حرارته والبطانة، وتزال هذه الحرارة بواسطة المبرد، فينتج البخار إما مباشرة أو بصورة غير مباشرة لتدوير العنفة (التربينه)، وقد تم توفير أنظمة ثانوية عدة لتنقية المبرد، ولأخذ العينات وغير ذلك.

يجب أن يكون الأمان في نظام التبريد عالياً جداً لأن معظم المبردات تصبح مشعة إلى حد ما، وإن أي تسرب منه ولو كان قليلاً جداً يؤدي إلى مشكلات تلوث إشعاعي. أما التسربات الكبيرة من المبرد فقد تؤدي إلى خفض مقدار الحرارة المزالة من القلب وتهدد سلامة المفاعل. ومن المهم أن يفهم بوضوح أن تحلل نواتج الانشطار في مفاعلات الطاقة يولد كمية لا يستهان بها من الحرارة، ولهذا لا بد من توافر التبريد بعد توقف المفاعل.

10-3-4 الحاجز الإحيائي (الخاص بحماية الأحياء):

الهدف من الحاجز الإحيائي هو خفض النيوترونات وأشعة جاما الصادرة من قلب المفاعل ومن نظام التبريد، حتى لا يتعرض موظفو تشغيل وصيانة المفاعل إلى جرعات زائدة. وأكثر المواد شيوعاً في عمل الحواجز كل من الرصاص والخرسانة والحديد والماء

والبوليثين، ومعامل تخفيض الإشعاع المطلوبة في مفاعلات الطاقة هو بحدود 10^8 إلى 10^9 ، وقد يظهر الوهن في الحاجز، حيث توفر قنوات التبريد وثقوب أخرى ممرات لتدفق الإشعاع.

يتكون الحاجز عادة من جزأين، هما: الحاجز الأساسي حول قلب المفاعل والحاجز الثانوي حول نظام التبريد. إن هذا الترتيب يسمح بالوصول إلى نظام التبريد (المدورات والمبادلات الحرارية... إلخ) عند غلق المفاعل حيث يعمل الحاجز الأساسي على خفض أشعة جاما المتولدة من تحلل نواتج الانشطار.

10-4 تزويد المفاعلات بالوقود:

يمكن أن ينتج الكيلو غرام الواحد من اليورانيوم الطبيعي (بملاً نحو حيز 50 سم³) في المفاعل النووي طاقة تصل إلى ما مقداره عشرة أطنان من الفحم الحجري تحرق في محطة طاقة تقليدية، هذا على الرغم من استهلاك 0.3 بالمائة فقط من ذرات اليورانيوم، وهذه النسبة تمثل تقريباً 40 بالمائة من ذرات اليورانيوم - 235 القابلة للانشطار. ونسبة اليورانيوم التي يمكن تحويلها إلى طاقة محدودة؛ لأن النسبة المتبقية ستصل في نهاية المطاف إلى حد غير كافٍ لإدامة تفاعل متسلسل. وإضافة إلى ذلك، فإن نواتج الانشطار المتولدة تشكل ضغطاً في الوقود يؤدي إلى انتفاخ القضبان وتشوهها، ولذلك فعندما يصل قضيب الوقود إلى الدرجة المطلوبة من الاحتراق يجب أن يستبدل بقضيب جديد (تذكر أنه مشع جداً).

في المفاعلات الكبيرة المبردة بالغاز يتم التزود بالوقود في أثناء تشغيل المفاعل، وتتم العملية بواسطة ماكينة تزويد وتفرغ تشغل عن بعد يكون موضعها فوق المفاعل، وتقوم برفع غطاء الحاجز الإشعاعي، وترتبط بوعاء الضغط، وتزِيل غطاء قناة الوقود ثم ترفع الوقود المستهلك من القناة إلى الماكينة الحاضرة تماماً للإشعاع، وتستبدل به قضباناً جديدة. وعندما تحوي الماكينة الحصة الكاملة من قضبان الوقود تتحرك إلى موضع

تتمكن معه من إطلاق القضبان عن طريق قناة مائلة حاجزة للإشعاع إلى خزان كبير من الماء يعرف بحوض التبريد الذي يوفر الحجز الإشعاعي والتبريد للقضبان المستهلكة. والماكينة مصممة بحيث تجعل هذه العمليات آمنة تماماً، ولهذا توفر حجراً عن قلب المفاعل فوق الفتحة غير المغلقة، وتوفر الحجز عن قضبان الوقود المستهلك داخل الماكينة، وتمنع أيضاً تسرب الغاز أو التلوث، وتوفر كذلك تبريداً لقضبان الوقود المستهلك، (الحرارة المتولدة من تحلل نواتج الانشطار في القضيب عند إزالته من المفاعل تكفي لزيادة سخونته إلا إذا توافر له تبريد خارجي).

في مفاعلات الماء الخفيف (الاعتيادي) لا يمكن تزويد المفاعل بالوقود في أثناء التشغيل لأسباب عدة، ويتم عملية التزود خلال الإيقاف السنوي عندما يستبدل نحو ثلث الوقود. وتشمل هذه العملية إفادة قناة فوق وعاء ضغط المفاعل، ثم إزالة غطاء وعاء المفاعل ورفع قضبان الوقود الواحد تلو الآخر إلى تجويف مملوء بالماء، ثم ينقل الجميع عن طريق القناة إلى حوض الخزن.

5.10 الأخطار الإشعاعية للمفاعلات:

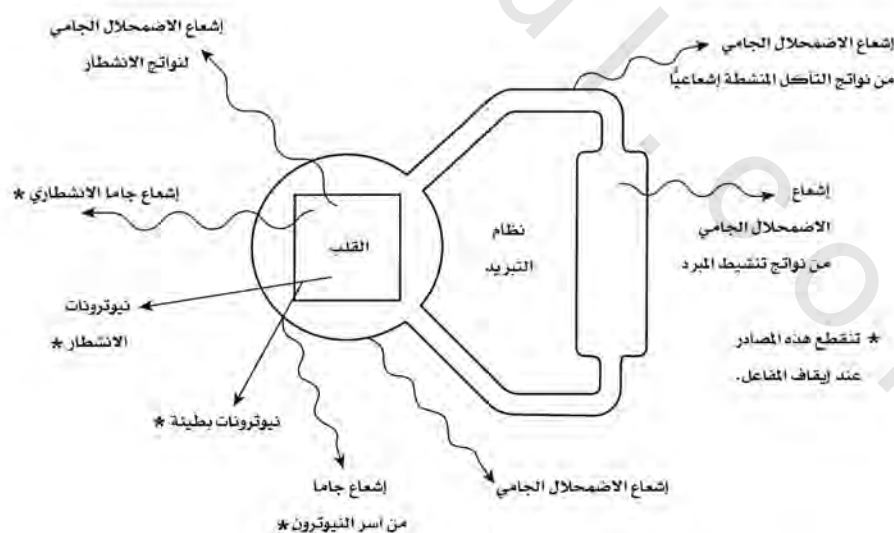
10-5-1 عموميات:

تكون الأخطار الإشعاعية للمفاعلات - عموماً - أقل عند تشغيل المفاعل منها عند إيقافه، وقد صمم الحجز الإشعاعي بحيث تكون الجرعات الإشعاعية مقبولة في الأماكن التي تتطلب فيها عمل الأشخاص، وهذا مثبت بالمسح الدقيق عند البدء في تشغيل المحطة، ويستمر بعد ذلك على مدد منتظمة، كما وفرت الأنظمة الأمنية التي تسمح بأخذ عينات من المبرد ومن غيره من السوائل المشعة. وفي خلال مدة إيقاف المفاعل يجري كثير من الأعمال غير الرتيبة، بعضها يجري على أنظمة مرتفعة الإشعاع جداً، ويجب التحكم الدقيق في مثل هذه المدد في تعرض الأشخاص للإشعاع وللتلوث الإشعاعي.

قد يؤدي خطأ جسيم أو تشغيل غير سوي إلى تلف ملموس في المحطة النووية، ثم يتسبب في مستويات خطيرة من الإشعاع أو من التلوث الإشعاعي. فإذا ما كان الخطر محدوداً بموقع المفاعل فيدعى عادة بطارئ موقعي، أما إذا ما امتد خطره إلى خارج الموقع فقد يصبح طارئاً عمومياً. وقد غطيت الحوادث التي من هذا النوع في الفصل السادس عشر.

10-5-2 مصادر الإشعاع:

المصادر الرئيسية للإشعاع في المفاعل في أثناء التشغيل هي القلب والمبرد، فالإشعاع من القلب يشمل كلاً من نيوترونات الانشطار وأشعة الانشطار الجامية، وجاما المتولدة من تحلل نواتج الانشطار، ومن أشعة جاما المتولدة نتيجة أسر النيوترونات، ومن التحلل الجامي للمواد المنشطة إشعاعياً، ويحصل الأخيران - بصورة رئيسة - في تركيب قلب المفاعل، وفي الحاجز. أما الأشعة الصادرة من المبرد فهي بصورة رئيسة أشعة جاما بسبب تنشيط كل من المبرد والشوائب التي يحتويها، وبسبب تلوث المبرد بنواتج الانشطار. وهذه المصادر موضحة في الشكل (10-7).



شكل (10-7) مصادر الإشعاع في نظام المفاعل النووي

الإشعاع من قلب المفاعل النووي:

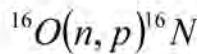
النيوترونات المتولدة في المفاعل نتيجة عملية الانشطار هي نيوترونات سريعة تتراوح طاقتها ما بين 0.1 إلى 15 ميغا إلكترون فولت. أما المعدل فهو نحو 2 ميغا إلكترون فولت، وتكون النيوترونات التي تخترق الحاجز الإحيائي قد مرت بدرجات متفاوتة من التهدة، ولهذا يمكن وجود نيوترونات مختلفة الطاقة تتباين من الطاقات الحرارية وحتى الطاقات السريعة.

وأشعة جاما المتولدة من الانشطار هي تلك التي تنطلق مباشرة بعد الانشطار، وهي متفاوتة بالطاقة من 0.25 إلى نحو 7 ميغا إلكترون فولت. أما أشعة جاما المتولدة من تحلل نواتج الانشطار في قضبان الوقود فتعدّ قليلة بالمقارنة بأشعة جاما المتولدة نتيجة الانشطار، ولكن عند إقفال المفاعل تتوقف الأشعة الأخيرة، في حين تستمر نواتج الانشطار في إطلاق الأشعة سنوات عدة بعد رفع الوقود من المفاعل.

ويؤدي أسر النيوترونات في مواد تركيب المفاعل وفي الحاجز إلى إطلاق ما يسمى بأشعة جاما الأسر، وتجعل هذه المواد مشعة، وتستمر الأشعة المتولدة من تحلل هذه المواد في الانطلاق حتى بعد وقف المفاعل كما هي الحال في نواتج الانشطار، واستطارة النيوترونات تقود إلى إطلاق أشعة جاما، ولكن لا تسبب عادة تنشيطاً إشعاعياً.

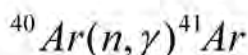
الإشعاع من المبرد:

يعدّ التفاعل المهم في كل من المفاعلات المبردة بالماء والمبردة بثاني أكسيد الكربون - كما ذكرنا سابقاً - هو:



لأن النيروجين - 16 يتحلل بعمر نصف قدره 7.2 ثانية باعثاً أشعة جاما شديدة الاختراق (6.1 ميغا إلكترون فولت)، وهذا يعني أن دائرة مبرد المفاعل مصدر مهم لأشعة جاما، وينبغي حجزها في بعض الأحيان.

ولقد استعمل الهواء في التبريد في أوائل المفاعلات التي صممت، واستعمل في مفاعلات ماكنوكس لتبريد الحاجز الإحيائي، ويوجد الهواء كشوائب في المفاعلات المبردة بالغاز وبالماء، فالأرجون الموجود في الهواء بنسبة 1.3 بالمائة يتنشط بالتفاعل الآتي:



ويتحلل الأرجون-41 بعمر نصف قدره 1.8 ساعة باعثة أشعة جاما بطاقة 1.29 ميغا إلكترون فولت. أما في المفاعل المنتج السريع المبرد بالمعدن السائل، والذي يستخدم الصوديوم مبرداً، فإن النواتج المهمة المنشطة إشعاعياً هي الصوديوم-22 والصوديوم-24.

ومع أن مبردات المفاعلات تعدّ نقية جداً بالمعايير الاعتيادية، لكنها تحوي دائماً بعض الشوائب، وعندما يتعرض لفيض عالٍ من النيوترونات في قلب المفاعل تصبح هذه الشوائب مشعة إلى درجة ملحوظة. وتتولد الشوائب نتيجة التآكل والتعرية في القلب وفي جهاز التبريد، فمثلاً في مفاعلات ماكنوكس والمفاعلات المتقدمة المبردة بالغاز يتجمع غبار الكرافيت (حيث يحتوي نفسه على شوائب) حول جهاز التبريد. وفي المفاعلات المبردة بالماء يعدّ الحديد والكوبلت والمنغنيز من الشوائب المعتادة بسبب تآكل جهاز التبريد، ويؤدي ترسب هذه المواد المتآكلة في قلب المفاعل إلى تراكم طبقة رقيقة من نواتج التآكل على سطح الوقود، تصبح هذه الطبقات مشعة جداً بسبب النيوترونات. إن استمرار انطلاق المواد من قلب المفاعل وترسبها بعد ذلك في منطقة ما خارج القلب تؤدي إلى تراكم المواد المشعة في جهاز التبريد.

يحتوي مبرد المفاعل عادة على مستويات من التلوث بنواتج الانشطار يسهل كشفها، وهذا يحدث نتيجة:

- (1) التلوث باليورانيوم من سطح قضيب الوقود.
- (2) شوائب اليورانيوم في مادة بطانة الوقود.
- (3) التحرر من قضيب وقود تالف.

وينظف المبرد باستمرار بواسطة وحدة تنظيف؛ كي لا تتراكم نواتج الانشطار طويلة العمر إلى درجة ملحوظة. وسبب النشاط الإشعاعي الرئيس لنواتج الانشطار عادة هما الغازان الخاملان الكريبتون-88 (^{88}Kr) والزينون-138 (^{138}Xe) وولائدهما الجسيمية الروبديوم-88 (^{88}Rb) والسيزيوم-138 (^{138}Cs)، ونظائر اليود-131 (^{131}I) و133 (^{133}I) و135 (^{135}I). هذا وقد يقود التلف الشديد في أحد قضبان الوقود إلى انتشار ملحوظ لنواتج الانشطار الإشعاعي في وحدة المبرد، ولهذا تزود معظم المفاعلات المبردة بالغاز بوحدة تعرف بوحدة اكتشاف الخلايا المنفجرة⁽¹⁾، تقوم بصورة آلية - وباستمرار - بتحسس كل قناة للوقود على الترتيب؛ لتعطي إنذاراً إلى موظف التشغيل إذا ما حدثت زيادة في النشاط الإشعاعي لنواتج الانشطار. وفي هذه الحالة يمكن تفريغ القناة الحاوية لخلية الوقود التي فيها عطب وذلك لاستبدال القضيب التالف. يتم الكشف عن وجود نواتج الانشطار في المبرد في المفاعلات المبردة بالماء بالتحليل الكيميائي الإشعاعي.

10-5-3 مصادر التلوث الإشعاعي:

مشعات بيتا: تتحلل كل من النويدات المشعة تقريباً والمذكورة في الفقرات السابقة بإطلاق جسيمات بيتا، ومن السهولة بمكان أسر أشعة بيتا بحيث لا يحتاج إليها مصممو الحاجز الإشعاعي كي يضعوها في الحسبان، بل يركزون على أشعة جاما المصاحبة لها، فإذا ما حدث تلوث إشعاعي بسبب تسرب مواد مشعة من وحدة المفاعل تصبح آنذاك أشعة بيتا ذات أهمية بالغة.

هناك نويدة مشعة ذات أهمية ملحوظة تتولد في جميع وحدات المفاعل وهي التريتيوم (^3H). ولهذه النويدة عمر نصف قدره 12.3 سنة. وتحلل بإطلاق جسيمات بيتا المنخفضة الطاقة فقط، وتتولد بالانشطار كما تتولد بتفاعل (n, γ) للديوتيريوم (الهيدروجين الثقيل)، وتفاعلات أخرى مختلفة مع الليثيوم والبورون، ففي المفاعلات التي

(1) حلية الوقود Fuel Can مجموعة من قضبان الوقود توضع في قناة واحدة.

تبرد أو تهدئ بالماء الثقيل تراكُم كمية كبيرة من التريتيوم، في حين يكون هذا التراكُم أقل تأثيراً في مفاعلات الماء الخفيف، نظراً لقلّة نسبة الهيدروجين الثقيل فيه ولتغيره المستمر (ليس من السهل استبدال الماء الثقيل، وذلك لغلاء ثمنه). ويحتوي الكرافايت على الليثيوم كشوائب، ولهذا يتولد التريتيوم في مفاعلات مازنوكس والمفاعلات المتقدمة المبردة بالغاز بالتفاعلات الآتية:



تسرب المبرد:

يمكن بالطبع أن يحدث تلوث بسبب تسرب المبرد، ففي مفاعلات الماء المضغوط يمكن أن يكون التسرب مباشراً إلى الجو أو أن يكون عن طريق المبادل الحراري إلى وحدة التبريد الثانوية، وفي هذه الحالة تحمل المواد المشعة وخاصة الغازات المشعة وهي ${}^{88}\text{Kr}$ و ${}^{138}\text{Xe}$ و ${}^{41}\text{Ar}$ مع البخار إلى العنقبة (التريبنة)، ومنها إلى الجو عن طريق المضخة الثانوية للهواء المكثف. تتحلل نواتج الانشطار الغازية الكريبتون-88 (${}^{88}\text{Kr}$) والزينون-138 (${}^{138}\text{Xe}$) إلى ولائدهما ${}^{88}\text{Rb}$ و ${}^{138}\text{Cs}$. أما التسرب في المبادل الحراري للمفاعل المبرد بالغاز فيؤدي عادة إلى تسرب البخار إلى الوحدة الرئيسة بسبب ارتفاع ضغط الوحدة الثانوية.

الاحتواء:

يحتوي قلب المفاعل تحت التشغيل على نحو 0.2 تيرا بيكريل من نواتج الانشطار لكل واط من طاقة التشغيل؛ لذا فالمفاعل الذي يشتغل بطاقة 1000 ميغاواط يحتوي على 2×10^8 تيرا بيكريل من نواتج الانشطار. وتحتوي هذه الكمية الهائلة من المواد المشعة داخل خلية الوقود أو بطانته، ويدعى هذا عادة المستوى الأول من الاحتواء. أما المستوى الثاني من الاحتواء فهو عند حدود الوحدات الرئيسة وهي وعاء الضغط

ووحدة التبريد، وهذه الحدود تحوي كذلك المواد المشعة في المبرد التي قد تصل بضع مئات من تيرا بيكريل في المفاعل نفسه، فإذا ما بقي الحاوي الأساسي والثانوي سليمين فليس هناك إلا خطر قليل في حدوث تلوث كبير، ومن المتوقع أن يحدث فعلاً بعض التلوث خلال تشغيل معظم المفاعلات. فمثلاً إن من الضروري أخذ عينات من المبرد بصورة دورية حيث غالباً ما تجد دفقاً مشعاً، ويمكن أن تقع أخطار التلوث في كلتا الحالتين، ولكن يمكن تقليل الأخطار بالتصميم الجيد للتجهيزات.

يشير مصطلح احتواء المفاعل في استعماله العام إلى الهيكل الذي يحوي كل وحدات المفاعل بأجزائها وتوابعها، مثال على ذلك الكرة المعروفة لمفاعل دوتريه السريع. إن عمل هذا الحاوي هو حماية عموم المواطنين بتقليص تسرب نواتج الانشطار في حالة وقوع حادث خطير في المفاعل (انظر الفصل السادس عشر).

10-5-4 المفاعل الموقف:

الصيانة:

يشكل المفاعل استثماراً كبيراً لرأس المال، ولهذا فإن مدد وقف المفاعل سواء أكانت سابقة الإعداد أم لا فإنها مكلفة. إن وحدات المفاعل بسيطة نسبياً ومرتبطة جيداً، وهي في العادة موثوقة جداً، ومعظم الصيانة التصحيحية والوقائية تجرى على الأجهزة الفرعية أو الثانوية. أما الصيانة العامة الرئيسة فقد تشمل تنظيف التلوث وتركيب مدورات تبريد وأنظمة قضبان التحكم، وفحص المبادلات الحرارية وأعمالاً أخرى متنوعة في الوحدات المشعة. ونظراً لضرورة الالتزام الدقيق بالمواعيد في هذه المدد، فإن ذلك قد يقود إلى انخفاض عام في معايير السلامة الإشعاعية والتقليدية التي قد تؤخر العمل. ولمنع حدوث مثل هذه الحالات يجب التخطيط لجميع الأعمال الرئيسة بالتشاور مع الجماهير ذات الشأن. ومن المستحسن في بعض الأحيان التدريب على الأعمال الصعبة

مسبقاً، ويجب أن يحصل الموظفون على تعليمات في مجال السلامة العامة، ويكونوا على علم بالأخطار المرافقة للعمل الذي يزاولونه.

الإشعاعات الخارجية:

عند وقف المفاعل يقوم الحاجز الأول بالحماية اللازمة عن نواتج الانشطار في قلب المفاعل، وسبب الأخطار الإشعاعية للعاملين في الوحدة الأساسية هو المواد المشعة في داخل الوحدة نفسها، ويميل معدل الجرعة في جوار الوحدة الأساسية إلى الانخفاض بسرعة خلال الأربع والعشرين ساعة التي تلي وقف المفاعل، ويعود السبب الرئيس في ذلك إلى تحلل المواد المشعة في المبرد، وإلى عملية التنظيف التي تتم بواسطة وحدة المعاملة، وبعدها لا تتغير المستويات الإشعاعية بصورة ملحوظة من يوم لآخر، فأعمار أنصاف معظم نواتج التآكل المشعة تتراوح ما بين شهر واحد إلى نحو خمس سنوات، وتباين معدلات الجرعة بصورة كبيرة من مفاعل إلى آخر. وفي الوحدات التي فيها مشكلات تأكل يمكن مواجهة معدلات للجرعة تتراوح ما بين 10 إلى 100 ملي سيفرت في الساعة في بعض الأقسام. وإذا ما كان معدل الجرعة زائداً فمن الممكن في بعض الأحيان توفير حماية إشعاعية إضافية في النقاط الحارة⁽¹⁾. والطريقة البديلة هي إزالة التلوث في القسم، ولا يمكن أن يتم هذا إلا خلال مدد التوقف الرئيسة.

تتطلب المناطق ذوات معدلات الجرعة الإشعاعية العالية تحكماً دقيقاً للعاملين فيها، ويأخذ هذا التحكم عادة شكل مراقبة شخصية في مدخل المنطقة. وقيّد الشخص الذي يدخلها بساعات محددة للعمل بناءً على المسح الإشعاعي للمنطقة، ويعلق الشخص مقياساً مباشراً للجرعة الإشعاعية مثل مقياس الجرعة الإلكتروني، ويوضع في السجل أوقات الدخول والخروج وقياس الجرعة.

(1) النقاط الحارة Hot Points ترمز إلى المناطق المرتفعة الإشعاع كما هي الحال في الخلايا الحارة Hot Cells.

التلوث:

عندما تتطلب الصيانة احتراق وحدة التبريد الأساسية فمن المتوقع حدوث تلوث، ومن البدهيات الضرورية عند الاحتراق الأول لقسم من الوحدة إزالة ضغط هذا الجزء. ومن الممارسات الجيدة أن يرتدي الموظفون المشاركون قناعاً كاملاً للوجه عند الدخول الأول إلى أحد أقسام الوحدة.

وتقيم مواصفات ملابس الحماية المطلوبة عند اختبارها على محطة بعينها، وهناك عادة عوامل أخرى تؤدي دوراً في اختيار ملابس ومعدات الحماية مثل درجة الحرارة والرطوبة واحتمال وجود غازات سامة، ويجب ألا يكون متوقعاً أن يلبس العاملون ملابس كاملة مثل بذلة الـ PVC⁽¹⁾ في درجات حرارة من 40° إلى 50° مئوية، إلا إذا كانت البذلة مكيّفة الهواء بالكامل، وهذا بدوره يسبب صعوبات في الحيز المحدود نتيجة ما يتطلبه من توصيلات للهواء. أما إذا كانت مستويات التلوث ملحوظة فينصح بوجود مرافق للمساعدة في إزالة الملابس الملوثة، وفي العادة يكون الشخص نفسه الذي يراقب دخول الأشخاص. وتجري أيضاً مراقبة دورية لمستويات الإشعاع في داخل المنطقة وخارجها.

6.10 مفاعلات الأبحاث:

لمفاعلات الأبحاث المتعددة الأنواع مشكلات خاصة في الفيزياء الصحية؛ لأن لها أغراضها وتطبيقات واسعة تشمل كلاً من البحوث البحتة، واختبار المواد، والإنتاج التجاري للمصادر المشعة. والمصدر الرئيس للمشكلات الإشعاعية في هذه المفاعلات -في العادة- أجهزة التجارب لا المفاعل نفسه، فمثلاً هناك ثقب عدة في الحاجز عملت للحصول على فيض عالٍ من النيوترونات خارج المفاعل لأغراض متعددة، ما يؤدي

(1) الـ PVC اختصاراً للاسم الإفرنجي Vinyl Poly Chloride وهو أحد أنواع البلاستيك.

بالحمل الحاوي للأجهزة التحريمية، أو المواد أن تصبح شديدة النشاط الإشعاعي. وفي هذه الحالات وغيرها يجب أن تتخذ احتياطات خاصة لحماية مشغلي المفاعل ومستعمليه.

7-10 أحواض الوقود:

7-10-1 مقدمة:

من المعتاد بعد رفع الوقود المستهلك من المفاعل، أن يوضع في مخزن للوقود أو في حوض تبريد على مقربة من المفاعل أشهراً عدة للسماح للوقود بالتحلل الإشعاعي. إن هذا الأجراء يسهل بعض المشكلات المتعلقة بنقل الوقود ذي النشاط الإشعاعي العالي من موقع المفاعل إلى محطة المعالجة.

تشكل الأحواض خطرين خاصين، إضافة إلى مشكلات التشغيل الرتيبة، وهما: حصول الكتلة الحرجة (الحراجة)، وحوادث فقدان الحاجر الإشعاعي.

7-10-2 حصول الكتلة الحرجة:

تحتوي الأحواض عادة كمية كافية من المواد الانشطارية لتصبح حرجة، أي لتبدأ تفاعلاً انشطاريًا متسلسلاً. وعموماً إذا ما كان كل الوقود في الحوض من اليورانيوم الطبيعي، فمن غير الممكن حصول الكتلة الحرجة حتى في أسوأ الحالات، أما إذا كان الوقود في الحوض من اليورانيوم المخصب أو من غيره من المواد الانشطارية مثل البلوتونيوم؛ فيمكن حصول الكتلة الحرجة. وتتم السيطرة على هذه الأخطار بخزن الوقود في تشكيلة آمنة، وذلك بترك مسافات كافية بين قضبان الوقود، أو بتحديد عدد قضبان الوقود التي قد تكون خارج موضع خزنها في أي لحظة.

10-7-3 فقدان الحاجز:

يحتوي حوض الخزن المثالي عادة على آلاف تيرايبكريل من نواتج الانشطار المشعة، وقد يحتوي القضيب الواحد على مئات تيرايبكريل. إن مثل هذا القضيب غير المحجوز يتسبب في حصول جرعة من أشعة جاما تزيد في معدلها على 1 سيفرت/ ساعة على بعد ثلاثة أمتار، وبالطبع يجب ألا يسمح لمثل هذه الحالة أن تقع.

إن فقدان الحاجز قد يحدث بفقدان ماء الحوض، أو برفع الوقود قريباً من سطح الماء، والنوع الأول الأكثر احتمالاً في الوقوع يكون سببه غالباً حادث ضخ الماء إلى الخارج، وليس بسبب تلف كبير في بناء الحوض، ويمكن تقليل احتمال وقوع ذلك بالتصميم الجيد لوحدة الماء، والتحكم الإداري في الوحدة (مثل وضع أقفال على الصمامات الرئيسية).

إن من الصعب التوقي تماماً ضد حوادث مداولة الوقود دونما فقدان محاسن الحاجز المائي مثل إمكانية الرؤية خلاله والمرونة.

إن التصميم الجيد للآلة الرافعة يجعل من المستحيل رفع الوقود عالياً جداً، إذا ما استخدمت الآلة المخصصة لذلك طبعاً، والبراعة القليلة يمكنها التفوق على أحسن الأنظمة.

ويمكن الاعتماد بصورة ملحوظة على مرقاب أشعة جاما المنصوب؛ لأنه يعطي تحذيراً عند الحالات التي تشكل خطورة.

10-7-4 شؤون التشغيل:

تحجز نواتج الانشطار المشعة داخل بطانة الوقود، فإذا ما حدثت ثغرة في البطانة؛ فإنها ستقود إلى تلوث الماء بنواتج الانشطار إلى حد ما تبعاً لنوع الوقود. وكثير من أحواض الخزن تحوي وحدة لاستخلاص الهواء تقوم بمسح سطح الماء، وذلك كإجراء احتياطي ضد تحرر نواتج الانشطار الغازية التي ستنتقل بسرعة من سطح الماء بعد

تحررها، كما يحدث بعض التلوث للماء نتيجة تحرر النواتج المشعة من تآكل سطح بطانة الوقود. ولمنع تراكم النشاط الإشعاعي في الماء فقد زُودت الأحواض بوحدة للمعالجة، وقد يكون من الضروري توافر مبرد للماء في بعض الأحيان تبعاً لكمية الوقود المخزون. وعمليات القطع في الحوض يمكنها أن تقود إلى مشكلات تلوث خطيرة من النشارة المتولدة عند قطع الوقود خاصةً. وقد يتعذر صيانة معدات القطع بسبب التلوث الشديد، ومستويات الإشعاع العالية.

10-7-5 أجهزة الحوض:

هناك ثلاثة أنواع من الأجهزة المستخدمة لإعطاء إنذار في الحالات الخطرة، وهي:

(أ) مراقب أشعة جاما المثبتة:

من العلامات الأساسية في أي حوض من أحواض الخزن. ومن الضروري وجود ثلاثة أجهزة على الأقل تكون في مواضع غير محجوزة عن سطح الحوض، وإذا ما سجل أحد الأجهزة معدل جرعة منخفضاً إلى حد ما مثل 0.1 ملي سيفرت/ ساعة، فإنه يقوم بإعطاء إنذار داخلي مثل جرس أو طنان ينذر المشغلين بأن هناك حالة فيها خطورة تتطور، أما في المستوى العالي من الإشعاع نسبياً مثل 10 ملي سيفرت/ ساعة في موقع المشغلين، فهناك جرس ينبه لإخلاء المبنى على أن يعمل هذا المنبه على جهازين من بين ثلاثة أو أربعة أجهزة لتجنب الإخلاء المزيف.

(ب) عداد ماء الحوض:

هذا جهاز بسيط يقوم بمراقبة الماء باستمرار؛ للكشف عن نشاط بيتا، ويعطي إنذاراً مبكراً عند حدوث تلف للوقود، وتستعمل لهذا الغرض عادة أنبوبة جايجر-ميولر للسائل المتساب مرتبط بمعدل.

(ج) مراقب للهواء:

يشتغل باستمرار لمراقبة الجسيمات المنتشرة جواً، ويوضع في المنطقة العامة أو في وحدة استخلاص الهواء، ويعطي إنذاراً عند ارتفاع مستوى الإشعاع المنتشر جواً بسبب العمليات التي تجري في الحوض، أو بسبب صيانة معداته.

8.10 معالجة الوقود:

يُنقل الوقود المشع إلى محطة معالجة الوقود بعد مدة من الخزن في حوض موقع المفاعل، من أجل خفض مستويات الإشعاع والحرارة الناتجة عنهما، وفي هذه المحطة يذاب الوقود في حامض النايترك بعد مدة أخرى من الخزن، ويفصل المحلول كيميائياً إلى ثلاثة مجاميع رئيسة، هي: اليورانيوم غير المستهلك، والبلوتونيوم وجميع المخلفات الشديدة الإشعاع، التي تحوي كل نواتج الانشطار تقريباً، وكذلك الأكسينيدات الأعلى تأثيراً كالأمريسيوم والكوريوم.

وتطرح محطة المعالجة مشكلات إشعاعية تزيد على مشكلات المفاعل، وذلك بسبب طبيعة المعالجة، فمحطة المعالجة هي أساساً محطة كيميائية معقدة تعالج محاليل شديدة الإشعاع، ويجب أن تحجز بمتراً أو أكثر من الخرسانة المسلحة عن مناطق التشغيل، ومع أنه قد توفرت التجهيزات التي تمكن من إجراء ذلك عن بعد، لكن لا مناص من الصيانة عن قرب. وعلى الرغم من إجراء تنظيف للتلوث لجزء المحطة المراد صيانتها، فإن هذا التنظيف لا يمكن أن يكون تاماً. وإضافة إلى ذلك، فإذا ما حدث تسرب للمحاليل المشعة - ولو كان قليلاً - إلى خلایا المحطة المحجوزة، فإن ذلك يؤدي إلى مشكلات إشعاعية وتلوث شديدين، ومن العسير تنظيف الخلية وسطوح المعدات من التلوث، فضلاً عما تستغرقه هذه العملية من طول في الوقت وطاقة في العمل.

لا يشكل جمع اليورانيوم أي مشكلات إشعاعية مؤثرة، ولكن جمع البلوتونيوم يتطلب درجة عالية من موصفات الاحتواء؛ لتجنب أخطار التلوث الشديد، ولا سيما الاستنشاق.

هذا إضافة إلى جمع المخلفات الشديدة الإشعاع التي تأخذ طريقها إلى خزانات خاصة؛ فإن هناك عدداً من مجاميع المخلفات المشعة الثانوية تعتمد معاملتها على الظروف المحلية، وسيأتي الحديث عن إدارة المخلفات المشعة في الفصل الحادي عشر.

والأمر الأهم هو احتمال وقوع حادث حرج؛ عند تصميم تجهيزات دورة الوقود وتشغيلها، فمثل هذا الحادث لن يؤدي فقط إلى إشعاع عالٍ من النيوترونات وأشعة جاما، بل سيقود إلى تناثر المواد المعاملة بسبب الطاقة المتحررة.

10-9 إزالة التجهيزات النووية الزائدة:

مع إيقاف كثير من الجيل الأول من منشآت مفاعلات البحوث وتوليد الطاقة حالياً، أصبح إزالة المحطات النووية الزائدة من الموضوعات الرئيسة في هذا الميدان بغية الأمان، وتحسين اقتصاديات الصناعة النووية، ووقعها البيئي.

لقد تم إنشاء المحطات الأولى دون أي اعتبار لإزالتها في نهاية المطاف، وأدى هذا في كثير من الحالات إلى تطلب طرق معقدة ومكلفة؛ لذا اقتضت الحاجة للتفكير في تصميم مناسب يسهل إزالة المنشأة مستقبلاً، ويتوقع أن يثمر ذلك فوائد إشعاعية واقتصادية على المدى البعيد.

إن المشكلات الخاصة التي تنشأ في التعامل مع المنشآت النووية الزائدة، منشؤها من الإشعاعية الباقية في المحطة في نهاية عمرها المفيد، ولهذا ثلاث عواقب تقنية:

- يتطلب احتواءً ذا مستوى رفيع للإشعاعية؛ لحماية السكان المحليين.

- الإشعاعية المتبقية في المحطة تشكل خطورة على العاملين الذين يتولون إزالة المحطة.

- إن الإنشاءات والمعدات المشعة، تشكل مصادر رئيسة مباشرة لسيل المخلفات المشعة، ويسبب المخلفات الثانوية الناتجة من عمليات إزالة التلوث والتفكيك.

إن مفتاح النجاح في مشروع الإزالة هو التخطيط المسبق، وهذا يبدأ عادة قبل سنوات من الموعد المحدد للغلق، وتبدأ الخطوات الأولى في وضع جرد مفصل للمحطة، وللمعدات والإنشاءات وتفصيل كامل لتصنيف الإشعاعية. وهذا التصنيف مبني على قياسات تفصيلية مبرمجة وملحقة بحسابات في معظم الأحيان، وهذا يسمح بتقدير جرد الإشعاعية كثير من المركبات المنوعة للمحطة، ويسمح كذلك بتقدير الأخطار الإشعاعية المتعلقة بعمليات التفكيك لغرض وضع الأسس لاختيار الطرق الهندسية، فمثلاً عندما تظهر التقديرات لمواجهة مستويات مرتفعة جداً من الإشعاع، ينبغي الأخذ في الحسبان استخدام معدات التشغيل عن بعد، والتصنيف الإشعاعي يسمح بتقدير المخلفات التي ستنتج ونوع التغليف المطلوب.

إن هدف برنامج الإزالة من وجهة النظر الإشعاعية هو التقليل المتتالي للأخطار التي تشكلها المحطة، لهذا فإن المرحلة الأولى للإزالة هي التنظيف العام للمنشأة وإزالة المواد المعالجة والمخلفات، وطبيعة المهام هذه مشابهة في معظم الأحيان لما يواجهه خلال التشغيل. إن العمل الرئيس في هذه المرحلة في حال المفاعل هو رفع الوقود وإزالته من الموقع، وهذا يزيل جزءاً كبيراً من المخزون المشع، ويزيل أساساً احتمال حدوث تحرر كبير للإشعاعية، والمرحلة الأولى في محطات المعالجة هي تنظيف معدات المعالجة بعد إيقاف التشغيل، ويشار إليها بـ (POCO) لإزالة ما أمكن من مواد المعالجة، وتشمل المرحلة اللاحقة عادة إزالة المحطة الاحتياطية والمعدات، ولا سيما تلك المواد غير المشعة التي لا يحتاج إليها في عمليات الإزالة.

بعد هذه المرحلة يعتمد العمل المتبع لأي منشأة بعينها على عوامل عدة، وتشمل الموجودات المشعة وطبيعة اضمحلالها، وتكلفة الخيارات المختلفة، وهناك اختلافات مهمة في الأسس المشتملة في إزالة المفاعلات مقارنة بمنشآت معالجة الوقود أو محطات الإشعاع الأخرى، ذلك لأن الإشعاعية كلها تبقى تقريباً على شكل مواد مشعة لبنية المفاعل، أما في المنشآت الأخرى فتكون الإشعاعية فيها على شكل مخلفات معالجة، وتلوث عام لبنية المحطة والمعدات.

ولهذا، فإن إزالة التلوث من نظام المفاعل مع كونه خطوة مفيدة قد لا يقلل بشكل ملحوظ الموجودات أو التأثير الإشعاعي لتفكيك المحطة. في حين في الأنواع الأخرى للمحطات يعدّ إزالة التلوث المبكر العامل الأساسي فيما يتعلق بتعرض الأفراد وفي إدارة المخلفات المشعة، والفرق الآخر هو طبيعة اضمحلال الإشعاعية، ففي حالة المفاعل يستحوذ على المخزون عادة ناتج التشعيع كوبلت - 60 (عمر نصفه 5.0 سنة) لذا فإن في تأخير تفكيك المفاعل عقود عدة فائدة ملحوظة في تقليل تعرض المشغل وتقليل المخلفات المتولدة، أما في محطات الوقود فإن الفوائد الناشئة قليلة من مثل هذا التأخير، نتيجة طول أعمار أنصاف كثير من النويدات المشعة الموجودة في المحطة.

إن طبيعة عمليات الإزالة تتطلب مستويات عالية من المسح الفيزيائي الإشعاعي، وخلال تفكيك المعدات والبنية، هناك دائماً إمكانية حدوث أخطار إشعاعية غير متوقعة، تنتج مثلاً عن تحرر تلوث وفقدان حواجز مصدر مشع، ومهما كان تصنيف جودة المحطة من البداية فإن حوادث كهذه يمكن أن تحدث، وهذا يعني أنه ينبغي مراقبة الأوضاع الإشعاعية خلال عمليات التفكيك، وينبغي مراقبة مستويات تعرض العاملين بشكل مستمر، ويفضل أن يكون ذلك باستخدام مقياس جرعة إلكتروني يعطي قراءة مباشرة، وينبغي أن تبقى مستويات ملابس الوقاية والمعدات التي يلبسها العاملون تحت المراجعة، وقد تستدعي بعض العمليات حماية كاملة للجهاز التنفسي، ولكن إذا استخدمت هذه المتطلبات بشكل زائد يكون نتيجتها تبطئة العمل وزيادة الجرعة من المصادر الخارجية.

ومع أن المشروعات تنفذ بنظام الإدارة الصارمة، وتستخدم طرقاً محددة مسبقاً وموافق عليها، فإن من المهم أن تكون الإدارة والنظام الموافق عليه فيهما قدر كافٍ من المرونة؛ حتى يمكن الاستفادة من الدروس المستفادة مع تقدم المشروع.

ومن الجوانب المهمة دائماً عند إزالة المنشأة لغرض تحرير الأرض التي كانت فيها المنشآت النووية أو الإشعاعية الأخرى، هناك إمكانية وجود مستويات منخفضة من الإشعاعية على سطح الموقع أو في أسفله، حتى بعد إزالة المحطة وبنيتها، ولهذا من الضروري قبل تحرير الموقع لاستخدام آخر، إجراء اختبارات منهجية دقيقة، وتصريح رسمي. والاختبارات تشمل برنامجاً مفصلاً لقياس الإشعاع مباشرة وأخذ عينات من التربة للتحليل المخبري، وعند الكشف عن مستويات ملحوظة من التلوث في الموقع، ينبغي اتخاذ برنامج معالجة للموقع، وهذا قد يشمل مسح مساحة الموقع وإزالة التربة إلى موقع رمي مخلفات مناسب وموافق عليه، وفي حالات أخرى تبعاً لمستويات ومدى التلوث ونوع النويدات الموجودة وخطة استخدام الموقع، قد يكون مقبولاً دفن التربة الملوثة مباشرة في الموقع نفسه، شريطة أن يكون الدفن عميقاً.

إن المعيار الذي يستند إليه في تحرير الموقع يختلف إلى حد ما من بلد لآخر. فلتحرير موقع نووي في المملكة المتحدة تعدّ الجهة المنظمة أن أي إشعاعية متبقية فوق الخلفية الطبيعية، التي يتبين أنها تشكل خطراً لأي شخص يقل عن واحد في المليون في السنة مقبولة بصورة عامة. وهذا يمثل متوسط معدل جرعة أعلى من الخلفية الطبيعية بنحو 20 مايكرو سيفرت/ سنة.

خلاصة الفصل:

الانشطار: هو انقسام النواة إلى شظيتين تتحلل إلى نواتج انشطار. تفاعل نيوتروني متسلسل يتطلب كتلة حرجة.

وحدة المفاعل: يحوي القلب مواد انشطارية وقضباناً للتحكم ومهدئاً، ومن السمات الأخرى وحدة التبريد والحاجز الإحيائي.

التزود بالوقود: في أثناء التشغيل أو بعد توقف المفاعل.

مصادر الإشعاع في أثناء التشغيل: نيوترونات الانشطار وأشعة جاما، وتحلل نواتج الانشطار تطلق أشعة جاما، وأسر النيوترونات يحرر أشعة جاما، وتحلل نواتج التشعيع تطلق أشعة جاما.

مصادر الإشعاع عند الإقفال: الانشطار ونواتج التشعيع تتحلل بقذف أشعة جاما.

التلوث: يمكن أن يحدث بسبب تسرب المبرد أو في أثناء عمليات الصيانة.

احتواء نواتج الانشطار مهم جداً لمنع التعرضات الزائدة.

أحواض خزن الوقود: يصاحبها خطران خاصان هما فقدان الحاجز والحرجة.

محطة معالجة الوقود: الفصل الكيميائي للوقود إلى مجاميع اليورانيوم والبلوتونيوم والمخلفات. مشكلات إشعاعية شديدة.

الإزالة: تفكيك المحطة والمعدات والتراكيب في نهاية العمر المفيد للمنشأة: أهمية التخطيط المسبق؛ المرحلة الأولى التنظيف الأولي، وفي المفاعلات إزالة الوقود: وقت المراحل الآتية يعتمد على نوع المحطة.

العلاج: تنظيف وتحرير استخدام الموقع الذي كان فيه منشأة إشعاعية لاستخدام آخر، يحتاج إلى مسح إشعاعي مفصل جداً ومعرفة بمستويات التلوث، وقد يتطلب إزالة تربة ملوثة ومخلفات إلى منطقة رمي مناسبة، معيار التحرير مبني على الخطر.

أسئلة للمراجعة

- (1) صف عملية الانشطار النووي، وشرح الظروف التي يمكن أن يحصل فيها تفاعل انشطاري متسلسل.
- (2) ارسم شكلاً مبسطاً لمفاعل نووي مثالي، موضحاً السمات الرئيسة للوحدة.
- (3) وضح مصادر الإشعاع في وحدة المفاعل النووي باستخدام شكل مبسط، وبين أيهما أهمية:
(أ) عندما يشتغل المفاعل.
(ب) عندما يكون موقفاً.
- (4) ما المقصود بمصطلح (الاحتواء) عند الكلام عن المفاعلات النووية؟
- (5) ناقش الأخطار الرئيسة لأحواض تخزين الوقود، كيف يمكن التحكم فيها؟
- (6) ما المقصود بمحطة معالجة الوقود؟ وما الأخطار الإشعاعية الرئيسة التي تراقبها؟
- (7) ناقش العوامل التي قد تؤثر على توقيت برامج إزالة المفاعلات النووية ومحطات الإشعاع الأخرى؟