

الحوادث النووية وسلامة المحطات

- مقدمة • مبادئ السلامة في المحطات النووية •
- تحليل الحوادث النووية المحتملة • تقويم الحوادث
- النوعية المحتملة • الحوادث النووية • التصميم
- الهندسي لسلامة المحطات النووية • تمارين

(١٢,١) مقدمة

ترتكز سلامة المحطات النووية على تطبيق مجموعة من الإجراءات لمنع الحوادث النووية وتسرب الإشعاعات المؤينة من هذه المنشآت، أو على الأقل تخفيف أثر تلك الحوادث على العاملين في مجال الإشعاع وعامة الجمهور والبيئة. وتشمل هذه الإجراءات عدة مجالات، مثل الطب، والصناعة، وإنتاج الطاقة، ونقل المواد المشعة، واستعمالها وتخزينها. ويتحقق أمن وسلامة المحطات النووية خاصة بتطبيق صارم لإجراءات معيارية محددة ابتداءً من التصميم والإنشاء والتشغيل والصيانة لتلك المنشآت وانتهاءً بالتدريب وتنفيذ خطط الطوارئ أثناء الحوادث النووية.

وتصدر المنظمات العالمية مثل الوكالة الدولية للطاقة الذرية توصيات معيارية لسلامة المحطات النووية، وغالباً ما تتحول تلك التوصيات إلى إجراءات وقوانين محلية لكل دولة. وتهدف هذه الإجراءات إلى تحقيق الأهداف الثلاثة الآتية :

- التأكد من أن المحطة النووية تشتغل وفق إجراءات السلامة المتفق عليها مسبقاً، ولا تسبب أضراراً إشعاعية للعاملين فيها ولا للبيئة.
- العمل على منع الحوادث النووية.
- تخفيف الضرر وآثار الحوادث عند حدوثها.

سندرس في هذا الفصل مبادئ السلامة للمنشآت النووية وتحليل بعض الحوادث المحتمل حدوثها. وستنطرق إلى تقويم أخطار تلك الحوادث وحساب الجرعة الإشعاعية الناجمة عن تلك الحوادث. وبعد ذلك سنتناول موضوع تحليل أسوأ الحوادث النووية، التي حصلت في بعض المنشآت لأخذ العبرة منها وتنطرق أخيراً إلى موضوع التصميم الهندسي لسلامة المحطات النووية في المستقبل.

(١٢،٢) مبادئ السلامة في المحطات النووية

تمثل مبادئ سلامة المحطات النووية وأمنها في عدم ترسب المواد المشعة أولاً، وذلك بالعمل على أن تكون هذه المواد داخل أوعية مخصصة ومحكمة الإغلاق ومعزولة بالحواجز اللازمة عن الجمهور والبيئة. أما المبدأ الثاني للسلامة، فيتمثل فيما يسمى بالدفاع عن العمق الذي ينص على تشغيل هذه المنشآت وفق إجراءات السلامة المعيارية المتعارف عليها، لكن من المحتمل أن تتعرض لحوادث يجب إدارتها حسب خطة مرسومة ذات مستويات دفاعية متعددة لتخفيف الضرر وجعل آثارها أقل ما يمكن.

(١٢،٢،١) الحواجز المتعددة

يعدُّ استعمال الحواجز المتعددة لعزل المواد المشعة من أفضل طرائق حماية العاملين في مجال الإشعاع وعامة الجمهور والبيئة من خطر التسرب الإشعاعي؛ ولهذا فإن كل المحطات النووية تعمل على تطبيق المبدأ الأول للسلامة باستخدام حواجز متتالية؛ لحصر المواد المشعة في أماكن محددة يصعب تسربها. وأوضح مثال على ذلك ما

يحصل في محطات القدرة النووية ، حيث إن جل المواد الانشطارية تكون داخل أقراص الوقود (ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2) ، الذي يعدّ الحاجز الأول. بعد ذلك يأتي الحاجز الثاني المتمثل في غلاف الوقود المصنوع عادةً من صفائح الزيركونيوم (Zr) أو الحديد غير قابل للصدأ. أما الحاجز الثالث فيتكون من وعاء قلب المفاعل ، الذي لا يقل سمكه عن عشرة سنتيمر من الحديد ، وبعد ذلك يأتي الحاجز الأخير أو البيولوجي المتمثل في مبنى المفاعل والمصنوع من الأسمنت المسلح ، الذي لا يقل سمكه عن واحد متر. وتصل الحواجز المتتالية إلى خمسة أحياناً في بعض المحطات الحديثة ، وكل ذلك لاحتواء تسرب المواد المشعة في كل الأحوال ، وحتى أثناء الحوادث.

(٢، ٢، ١٢) إستراتيجية الدفاع عن عمق

أخذت إستراتيجية الدفاع عن عمق من المخططات الدفاعية العسكرية ، المتمثلة في حلقات دفاعية متتالية ؛ للحد من تسرب المواد المشعة ، واتخاذ الإجراءات والتدابير اللازمة لاحتواء المخاطر والضرر الإشعاعي. وتشتمل الحلقة الأولى من الداخل في المحافظة على تشغيل المحطة في حدود طاقتها المصممة لها مسبقاً. أما الحلقة الثانية فهي تتمثل في المراقبة والحماية من الإشعاعات عن طريق قياس مستوى الإشعاع في الأماكن المختلفة في المحطة اللازمة. وبعد ذلك تأتي الحلقة الثالثة المتمثلة في أدوات التحكم الهندسية الأوتوماتيكية واليدوية ؛ للتحكم في سير العمليات داخل المحطة ، وإيقافها عند الحاجة اعتماداً على مؤشرات أجهزة القياس. أما الحلقة الأخيرة في هذه الإستراتيجية فتتمثل في الإجراءات وخطط الطوارئ عند حصول الحوادث النووية سواء كانت بسيطة بتسرب كميات قليلة من المواد المشعة ، أو كارثية ، مثل فقدان السيطرة على العمليات داخل المحطة ، وتسرب كميات كبيرة من الإشعاعات خارج المحطة. ونلاحظ أن هذه الإستراتيجية تعمل تدريجياً على احتواء المخاطر الإشعاعية وعند الالتزام بتطبيقها ، فإنها تؤدي إلى أمن وسلامة المحطة والبيئة في كل الأحوال.

أهم النظائر المشعة القابلة للتسرب (١٢, ٢, ٣)

أهم النظائر المشعة القابلة للتسرب من المحطات النووية التي لها تأثير على الصحة ، هي المواد الانشطارية ، وسلسلة عناصر الأكتينيد ($Z \geq 89$) الناتجة عن تفاعل النيوترونات. وتوجد هذه النظائر بكثرة في محطات القدرة النووية ، ومحطات تكرير الوقود المستعمل ، أما محطات تصنيع الوقود فلا تحتوي إلا على القليل من هذه النظائر ، مما يجعل حجزها والحماية من تسربها سهلاً نسبياً. وتمثل هذه النظائر المشعة سواء كانت غازية أو صلبة خطراً على الصحة عندما تُستنشق أو تُبتلع ثم تتراكم في الأعضاء الحساسة. يوضح الجدول رقم (١٢, ١) أهم النظائر المشعة الانشطارية القابلة للتسرب أثناء الحوادث النووية لمحطات القدرة النووية ومحطات تكرير الوقود المستعمل. ويوضح أيضاً هذا الجدول كمية الجرعة الداخلية لأعضاء الجسم التي لها قدرة عالية لامتصاص بعض النظائر المشعة.

الجدول رقم (١٢, ١). أهم النظائر المشعة القابلة للتسرب من المحطات النووية [٩].

الجرعة الداخلية mrem/ μ Cl	العمر النصفى الفعلى	نسبة الترسب في العضو	نسبة الإنتاج في عملية الإنشطار	العمر النصفى	العضو- النظائر
					العظم
413	50 d	0.28	4.8	50 d	⁹⁰ Sr
44,200	18 y	0.12	5.9	28 y	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y
337	58 d	0.19	5.9	58 d	⁹¹ Y
1,210	240 d	0.075	6.1	280 d	¹⁴⁴ Ce- ¹⁴⁴ Pr
					الغدة الدرقية
1,484	7.6 d	0.23	2.9	8.1 d	¹³¹ I
54	2.4 h	0.23	4.4	2.4 h	¹³² I
399	20 h	0.23	6.5	20 h	¹³³ I
25	52 m	0.23	7.6	52 m	¹³⁵ I
124	6.7 h	0.23	5.9	6.7 h	¹³⁵ I

تابع الجدول رقم (١٢,١).

الجرعة الداخلية mrem/ μ Ci	العمر النصفي الفعلي	نسبة الترسب في العضو	نسبة الإنتاج في عملية الإنشطار	العمر النصفي	العضو- النظائر
					الكلية
6.9	13 d	0.01	2.9	40 d	¹⁰³ Ru- ^{103m} Rh
65	19 d	0.01	0.38	1.0 y	¹⁰⁶ Ru- ¹⁰⁶ Rh
46	10 d	0.02	1.0	34 d	^{129m} Te- ¹²⁹ Te
					العضلات
8.6	17 d	0.36	5.9	33 y	¹³⁷ Cs- ^{137m} Ba

h : ساعة، d : يوم، m : شهر، y : سنة.

على الرغم من أن معظم هذه النظائر لها عمر نصفي قصير، إلا أنها تُمثل خطراً صحياً محدقاً للأشخاص، الذين يتعرضون لكميات كبيرة منها أثناء انتشارها. ومن الملاحظ أن أهم النظائر خطورة على الصحة نظير السترونسيوم ⁹⁰Sr والسيزيوم ¹³⁷Cs ونظائر الأيودين ¹³¹⁻¹³¹I وذلك لأن السترونسيوم والنظير المولد له الإيتريوم ⁹⁰Y يتركزان في العظام بكثرة مما يعرض خلايا الدم إلى السرطان (اللوكيميا)، أما نظائر الأيودين، فهي تتركز بكثرة في الغدة الدرقية مما يسبب لها الإصابة بالسرطان عندما يتعرض الجسم لامتصاص كميات كبيرة من هذه النظائر.

(١٢,٣) تحليل الحوادث النووية المحتملة

يُعد تقرير تحليل الحوادث النووية المحتملة من الإجراءات الأساسية عند تقديم ملف الموافقة لإنشاء وتشغيل المحطات النووية، الذي يُقدم لموافقة الجهات المختصة في الدولة. ويختص هذا التقرير بتحليل كل الحوادث المحتملة والخطة المعدة لتفاديها، أولاً عن طريق أدوات التحكم والإجراءات اللازمة لذلك، وثانياً تفصيل خطة الطوارئ

لتخفيض خطر تسرب الإشعاعات من المحطة إلى البيئة في حالة حدوث الحادث. وعادة ما تقسم الحوادث في هذا التقرير إلى ثلاثة أنواع.
أولاً: الأحداث متوسطة التكرار

تشمل الأحداث متوسطة التكرار مجموعة من الحالات المؤقتة الطارئة أثناء تشغيل المحطة بسبب عطل بسيط، أو تدخل غير سليم لأحد العاملين في نظام التشغيل. ومن الأمثلة على ذلك زيادة أو نقصان بسيط في تدفق سائل التبريد في محطات القدرة النووية، أو زيادة بسيطة للكتلة في خزانات المواد الانشطارية، التي ربما تُقربها إلى الكتلة الحرجة في محطات تكرير الوقود المستعمل. وعادة ما تُعالج هذه الأحداث أوتوماتيكياً من طرف نظام التحكم دون اللجوء إلى إيقاف المحطة.

ثانياً: الأحداث النادرة

تشمل الأحداث النادرة مجموعة من الحوادث لها احتمال حدوث ضعيف خلال عمر المحطة ينتج عنه تسرب إشعاعي محدود. وعادة ما تكون هذه الأحداث ناتجة عن عطل ميكانيكي لأحد أنابيب سائل التبريد الصغيرة، أو فقدان التيار الكهربائي لتشغيل أجزاء من محطات القدرة النووية. وكذلك الحالة في محطات تكرير الوقود المستعمل، التي يمكن أن تتعرض أيضاً لبعض الحوادث، مثل تعطل بعض المضخات أو نظام التهوية بسبب كسر أو انسداد بعض القنوات في غرف التكرير. وعلى الرغم من أن المعدات المستخدمة في هذه المحطات تكون عالية الجودة، إلا أن افتراض تعطلها وارد كما هو الحال بالنسبة للأخطاء البشرية أثناء تشغيل تلك المحطات؛ ولذلك تجب دراستها ورسم الخطط لمعالجتها.

ثالثاً: الأحداث النادرة جداً

تشمل الأحداث النادرة جداً بعض الحالات التي لها احتمال حدوث ضعيف جداً خلال عمر المحطة، إلا أنها إذا وقعت فنتائجها تكون كارثية على المحطة بسبب

تسرب كميات كبيرة من الإشعاعات إلى البيئة مما يستوجب أحياناً خطة طوارئ لترحيل السكان بجوار المحطة. والمثال على ذلك تعطيل نظام التبريد حتى ذوبان جزئي أو كامل لقلب المفاعل النووي، أو حدوث زلزال تحت محطة تكرير الوقود، مما يؤدي إلى انهيار المباني وتسرب كميات كبيرة من الإشعاعات إلى البيئة.

تجدر الإشارة إلى أن كل أنواع الحوادث المذكورة سابقاً يُقوّم احتمال حدوثها، ثم دراسة نتائجها. ويقوم الحاسب الآلي عادة بالحسابات اللازمة لتغير درجة الحرارة، وكثافة المواد، وتأثيرها عن ديناميكا السوائل والنيوترونات، وقدرة المفاعل لمحاكاة كل حادثة، وذلك باستخدام كود خاص لكل حالة. وتساهم نتائج هذه الحسابات في تعزيز السلامة أثناء التصميم والتشغيل والتخطيط لحالة الطوارئ.

وستتناول فيما يلي بعض الحوادث النووية المحتملة لمحطات القدرة النووية؛ لأن المحطات الأخرى نادراً ما تسبب حوادث كارثية لصغر كمية المواد المشعة نسبياً والتي يتعامل معها داخل تلك المحطات.

(١٢,٣,١) حوادث فقدان تدفق سائل التبريد

تنتج كل المفاعلات النووية كميات هائلة من الحرارة بسبب الانشطار المتسلسل في الوقود، وتنقل هذه الحرارة عن طريق سائل أو غاز لإنتاج بخار الماء ومن ثم توليد الكهرباء. ويعتمد نظام تبريد قلب المفاعل على مضخات كبيرة ومراوح لتدوير سائل أو غاز التبريد. ويُعد انخفاض تدفق سائل أو غاز التبريد أو فقدانهما من أخطر الحوادث؛ لأنه يؤدي في أسوأ الحالات إلى ذوبان قلب المفاعل، ثم إلى كارثة بيئية بسبب تسرب المواد المشعة.

تعدد أسباب انخفاض أو فقدان تدفق سائل التبريد، ومنها على سبيل المثال، كسر أحد أنابيب حلقة التبريد الأولى أو مجموعة منها، أو توقف إحدى المضخات، أو انسداد أحد الصمامات لسبب ما ولو عن طريق الخطأ.

وتؤدي عادة هذه الأعطال إلى زيادة حرارة سائل التبريد وانخفاض الكثافة وزيادة الضغط مما يؤثر مباشرة على قدرة المفاعل. ويتولى في هذه الحالات نظام التحكم معالجة هذه الأحداث إذا كان مصمماً بطريقة سليمة سواء بتعويض فقدان التدفق، أو إخماد المفاعل أتماتيكياً وإن لم يُجد ذلك، تتم المعالجة عن طريق التدخل اليدوي. يُعدُّ فقدان تدفق سائل التبريد من أسوأ حوادث المفاعلات النووية التي يجب افتراضها، على الرغم من قلتها، والتخطيط لمعالجتها بسرعة إثر حدوثها لمنع ذوبان قلب المفاعل. ومن الأسباب الرئيسية لفقدان تدفق سائل التبريد انقطاع التيار الكهربائي، أو كسر أنابيب التغذية الرئيسية لحلقة التبريد الأولى خاصة، أو شرخها، أو انسدادها، وكذلك للحلقة الثانية أحياناً. وعند حدوث هذا النوع من الأعطال يجب أن يكون نظام التحكم قادراً على إخماد المفاعل مباشرة ثم يُشغل النظام الاحتياطي لتبريد قلب المفاعل بسرعة ومنعه من الذوبان. علماً أن عملية التبريد يجب أن تتواصل حتى بعد عملية الإخماد لأن المفاعل يواصل إنتاج حوالي ٧٪ من قدرته بسبب تفكك النظائر المشعة. ويكمن خطر هذه الأحداث في سرعتها، حيث إن تأخر تشغيل النظام الاحتياطي للتبريد بثوانٍ فقط يسبب إتلاف المفاعل وكارثة بيئية.

(٢، ٣، ١٢) حوادث فقدان امتصاص الحرارة

سبب حوادث فقدان امتصاص الحرارة هو توقف مفاجئاً لإحدى مضخات تغذية الحلقة الثانية للتبريد بين المكثف والمبادل الحراري. وتؤدي هذه الأحداث، إن لم تُعالج فوراً، إلى انخفاض كفاءة امتصاص الحرارة من الحلقة الأولى لتبريد المفاعل، مما يسبب ارتفاع درجة حرارة سائل التبريد، ومن ثم انخفاض الكثافة وزيادة ضغط الوعاء وتغير قدرة المفاعل. وأفضل طريقة لمعالجة هذه الأحداث هو التصميم الجيد للمفاعل من البداية واستخدام نظام تحكم سريع قادر على التفاعل مع كل الأحداث المحتملة. ولهذا الغرض، فإن كل المفاعلات الحديثة التي تستخدم الماء لتبريد قلب

المفاعل وتهدئة النيوترونات صُممت على أن يكون عاملاً الحرارة والفراغ (تعويض الماء بالبخار) بها سالبين، مما يجعل ارتفاع الحرارة سبباً في انخفاض قدرة المفاعل بشكل طبيعي وتلقائي. وتعمل التصميمات الحديثة على بناء نظام تحكم جيد لإدارة الأحداث بسرعة وتعديد نُظم الاحتياط وكثرة الحواجز المتتالية لعدم تسرب المواد المشعة وتساعد كل هذه التدابير في سلامة المحطة.

(١٢,٣,٣) حوادث فقدان التحكم في الفاعلية

يؤدي التحكم غير السليم في الفاعلية إلى حوادث نووية لا يُحمد عقبائها وتصبح السيطرة عليها خاصة في المفاعلات التي تتميز بسرعة فائقة في تضاعف القدرة. وتبدأ حوادث التحكم في الفاعلية عادة نتيجة اضطرابات في الفاعلية وعدم توازن قدرة المفاعل، أو فقدان تدفق سائل التبريد، وارتفاع درجة حرارة المفاعل. ومن أسباب اضطرابات الفاعلية إدخال مفاجئ لكمية موجبة كبيرة من الفاعلية بسبب سحب مجموعة من قضبان التحكم عن طريق الخطأ أو لسبب آخر. أما الخلل في تدفق سائل التبريد المذكور سابقاً، فتسببه أيضاً اضطرابات في الفاعلية لبعض المفاعلات نتيجة التغيرات المفاجئة في كثافة سائل التبريد (الفراغ). وتحصل أيضاً اضطرابات في الفاعلية بسبب تغيرات سريعة لحرارة قلب المفاعل نتيجة حوادث امتصاص الحرارة ومعالجتها بطريقة غير سليمة، وذلك بإدخال كميات كبيرة من الماء البارد لقلب بعض المفاعلات.

لقد تناولنا بالتفصيل موضوع ديناميكا المفاعلات النووية وتغير الفاعلية في الفصلين الثامن والتاسع، ولكن نريد أن نؤكد هنا على العلاقة بين الفاعلية وقدرة المفاعل من ناحية، ونذكر أن أهم قواعد السلامة أن يصمم المفاعل بحيث يكون معامل الحرارة دائماً سالباً، لكي يعمل على الحد من قدرة المفاعل عند ارتفاع مفاجئ للحرارة. وباختصار يمكن حساب قفزة قدرة المفاعل أثناء المرحلة الانتقالية إثر تغير مفاجئ للفاعلية باستخدام المعادلات الآتية:

أولاً: معادلة قدرة المفاعل

$$(١٢,١) \quad \frac{dP}{dt} = \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n$$

حيث إن:

P: قدرة المفاعل و n تمثل كثافة النيوترونات في قلب المفاعل.

β : نسبة النيوترونات المتأخرة.

Λ : عمر دورة حياة النيوترونات الفورية.

$\rho_0 - \alpha T = \rho$: الفاعلية علماً أن α تمثل معامل الحرارة للفاعلية.

T: تمثل درجة حرارة المفاعل.

كما أن درجة الحرارة مرتبطة بكثافة النيوترونات بحيث إن $\frac{dT}{dt} = kn$ و k تمثل

عكس السعة الحرارية.

ثانياً: معادلة تغير القدرة مع الفاعلية

$$(١٢,٢) \quad \frac{dn}{d\rho} = -\frac{(\rho - \beta)}{\alpha \kappa \Lambda} \Rightarrow n = A - \frac{(\rho - \beta)^2}{2 \alpha \kappa \Lambda}$$

حيث إن:

A: ثابت التكامل

ثالثاً: معادلة القدرة القصوى أثناء قفزة الفاعلية

يحصل المفاعل على القدرة القصوى بالضغط أثناء قفزة الفاعلية عند نقطة بداية

ردة الفعل ($\rho = \beta$) ويمكن حساب هذه القيمة بتفاضل كثافة النيوترونات ومساواتها

بالصفر.

$$(١٢,٣) \quad \frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow \dot{n} = \frac{1}{2 \alpha \kappa \Lambda} [(\rho_0 - \beta)^2]$$

يُمكن أيضاً كتابة هذه المعادلة بشكل آخر، وذلك باستعمال جذور معادلة "الإينأور" للفاعلية ω لنحصل على ما يلي:

$$(١٢,٤) \quad \dot{n} = \frac{\Lambda \omega^2}{2 \alpha \kappa} ; \quad \omega = \frac{(\rho_0 - \beta)}{\Lambda}$$

ويستنتج مما سبق القيم العظمى لدرجة حرارة الوقود والطاقة المنتجة وفق المعادلات الآتية:

$$(١٢,٥) \quad T = \frac{2(\rho_0 - \beta)}{\alpha}$$

$$(١٢,٦) \quad E = \frac{2(\rho_0 - \beta)}{\alpha \kappa}$$

تجدر الإشارة إلى أن سلامة المفاعل تقتضي تصميمه بحيث لا يسمح لدرجة حرارة غلاف الوقود أن تصل في كل الأحوال إلى درجة عالية تسبب إتلافه، ومن ثم تسرب المواد المشعة من الوقود.

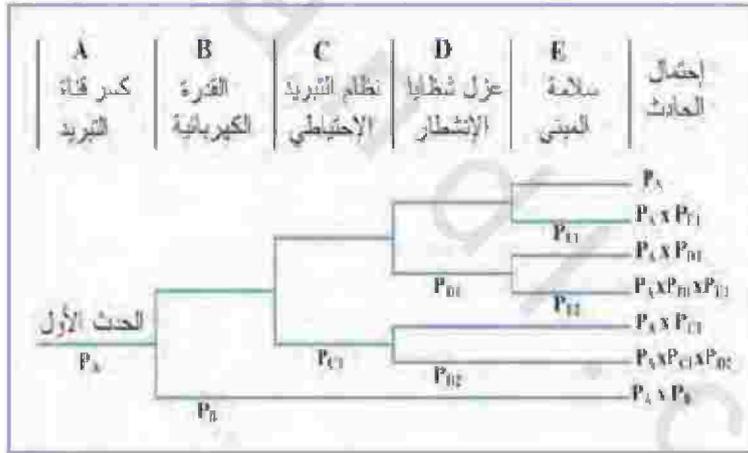
(١٢,٤) تقويم الحوادث النووية المحتملة

يعتمد تقويم الحوادث النووية المحتملة في مجال النقل والصناعة على دراسة احتمال أخطاء التشغيل وأعطال المعدات. وتستعمل أيضاً هذه الطريقة لتقدير احتمال الحوادث النووية الناتجة عن سلسلة من الأخطاء والأعطال البسيطة المتوقعة. واستناداً إلى هذه الحسابات الاحتمالية يمكن تطوير التصميم وتشديد إجراءات السلامة لتخفيض مستوى الضرر في مختلف النشاطات الإنسانية، ومن بينها التطبيقات السلمية للطاقة الذرية.

(١٢,٤,١) احتمال الحوادث النووية

يشمل التقييم الاحتمالي لسلامة المحطات النووية التعرف على الحالات غير الطبيعية التي تؤدي إلى حوادث نووية ذات مستويات مختلفة ثم تحليل دراسات الضرر

الإشعاعي المتوقع لكل منها. وتستعمل نتائج هذا التقويم لتحسين سلامة المحطة أثناء التصميم والتشغيل والصيانة وتخفيض مستوى الضرر. ويبدأ هذا التقويم أولاً بمحصر احتمال الحوادث الأولية (فقدان سائل التبريد مثلاً) المسببة للحوادث النووية، وأعطال المعدات (انقطاع التيار الكهربائي مثلاً)، وأخطاء التدخلات الممكنة لمعالجة الوضع (تشغيل المولد الاحتياطي - إخماد المفاعل)، وتقويمها بعد ذلك. ثانياً يُدرس تسلسل الأحداث بعضها بعضاً (ارتفاع درجة الحرارة - تأثير الفاعلية) وارتباطها، ثم رسم شجرة تفرع الأحداث وتسلسلها لتقويم كفاءة نظام السلامة، وحساب الاحتمال الإجمالي للحوادث المتوقعة (تسرب المواد المشعة - ذوبان قلب المفاعل) كما هو موضح في الشكل رقم (١٢، ١) الآتي:



الشكل رقم (١٢، ١). شجرة تسلسل الأحداث لحساب احتمال الحوادث النووية.

تجدر الإشارة إلى أن دقة التقويم الاحتمالي للسلامة تكمن في صعوبة اختيار قيمة احتمال الأحداث الأولية التي تعتمد فقط على الخبرة والدراسة وتكرار أعطال المعدات وأخطاء التدخل أثناء الحالات الطارئة سابقاً.

(١٢, ٤, ٢) انتشار النظائر المشعة وتقدير الجرعة الإشعاعية

تُقدر الجرعة الإشعاعية والضرر الصحي الناتج عن تعرض العاملين والجمهور إثر الحوادث المحتملة بكمية النظائر المشعة المتسربة وكيفية انتشارها وتركيز تلك النظائر في الأعضاء الحساسة.

(١٢, ٤, ٢, ١) انتشار النظائر المشعة وتشتتها

لقد أثبتت عدة دراسات أن سحابة الدخان أو البخار المحمل بالنظائر المشعة المتسربة من مداخل المنشآت النووية تنتشر في الاتجاه العمودي أو الأفقي حسب سرعة الرياح وحالة الطقس. وعند اعتماد نموذج هذا الانتشار وافترض أن فوهة المدخنة مصدراً نقطياً للإشعاعات نجد أن النظائر المشعة المتساقطة على الأرض لها توزيع "قوس" المشهور الآتي:

$$(١٢,٧) \quad X(x, y) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z \bar{u}} \cdot \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

حيث إن:

$X(x, y)$: التركيز الإشعاعي عند مستوى الأرض في النقطة (x, y) (Curie/m³).

Q : شدة الإشعاع للمصدر (Curie/sec).

h : ارتفاع فوهة المدخنة عن سطح الأرض، (m).

\bar{u} : متوسط سرعة الرياح في اتجاه محور السحابة (m/sec).

y : المسافة الأفقية عن محور السحابة (m).

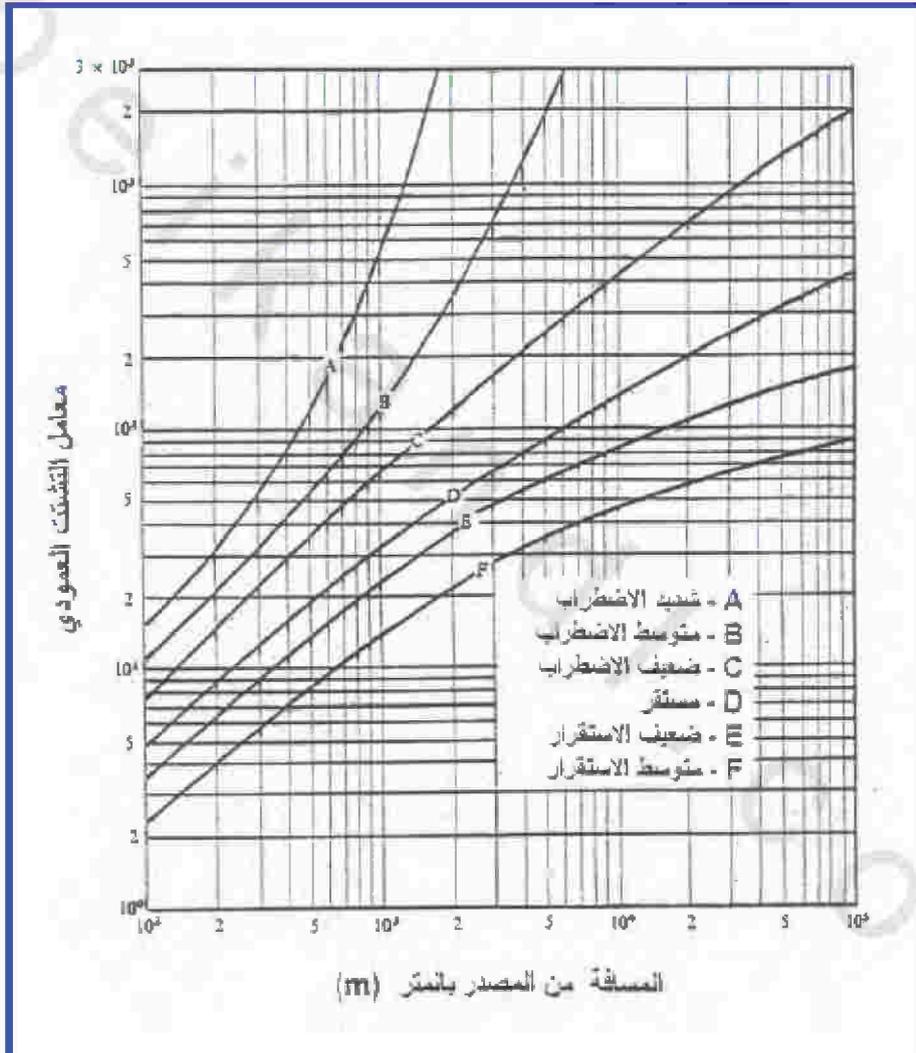
σ_y : الخطأ المعياري لتركيز النظائر المشعة في الاتجاه الأفقي عن محور السحابة.

σ_z : الخطأ المعياري لتركيز النظائر المشعة في الاتجاه العمودي عن محور السحابة.

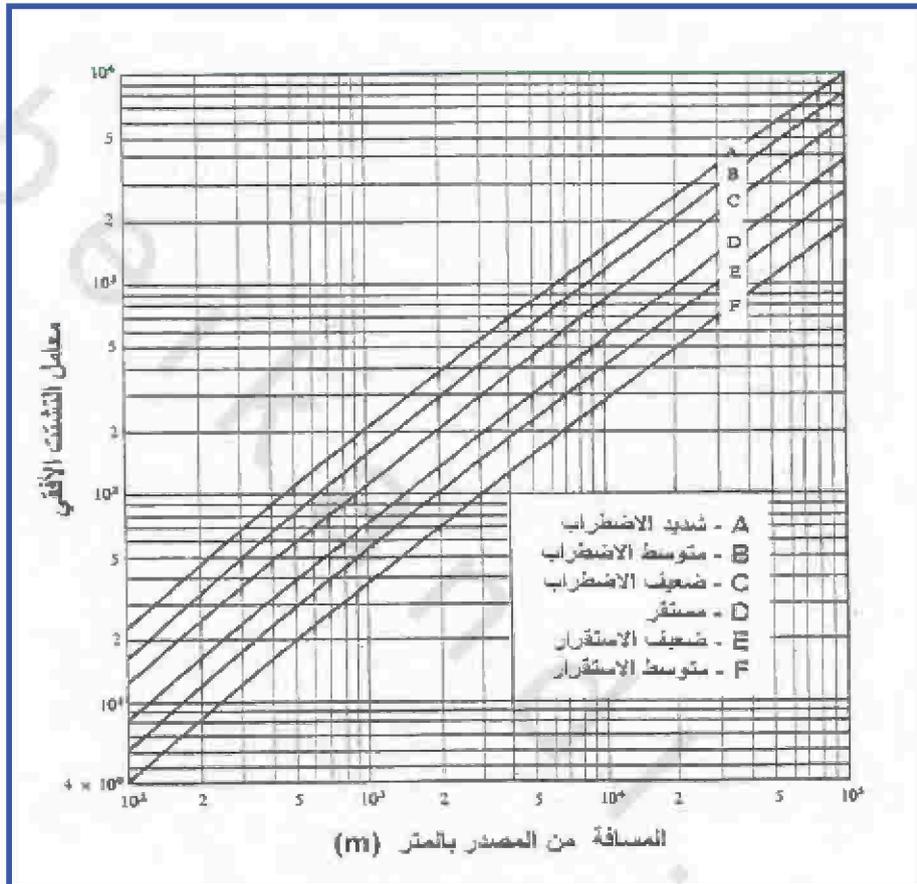
قيم الأخطاء المعيارية σ_y و σ_z مرتبطة بالمتغير x وتزداد هذه القيم كلما ابتعدنا

عن المصدر، كما هو الحال بالنسبة لقطر السحابة. وقُدِّرَت هذه القيم تجريبياً حسب

الأحوال الجوية من طرف الباحث "باسكيول" (Pasquill) كما هو موضح في الشكل رقم (١٢,٢) والشكل رقم (١٢,٣).



الشكل رقم (١٢,٢). معامل التشتت الأفقي للنظائر المشعة حسب الأحوال الجوية [١٦].



الشكل رقم (١٢,٣). معامل التشتت العمودي للنظائر المشعة حسب الأحوال الجوية [١٦].

تجدر الإشارة إلى أن المعادلة (١٢,٧) عادة ما يتم تبسيطها، وذلك بحساب المتغير $y=0$ لحساب الجرعة عند سطح الأرض فتصبح المعادلة على النحو الآتي:

$$(١٢,٨) \quad X(x, y) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z \bar{u}} \cdot \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

خلال الساعة الأولى من التسرب الإشعاعي يجب الأخذ في الحسبان تأثير المبنى الذي يزيد من اضطرابات الريح وتشتت النظائر حوله مباشرة. ولمعالجة ذلك يُنقل الموقع الحقيقي للمصدر إلى موقع عكس اتجاه الريح، ويقع على مسافة يصبح فيها عرض السحابة يعادل عرض المبنى.

(١٢,٤,٢,٢) تقدير الجرعة المكافئة لكامل الجسم

تقدر الجرعة الممتصة في مناطق تساقط النظائر المشعة على الأشخاص حول المحطة حسب تركيز تلك النظائر وأنواعها، علماً أن مسار امتصاص الإشعاعات يكون خارجياً لكامل الجسم وداخلياً عن طريق التنفس والابتلاع (الأكل والشرب). ويتناسب معدل الجرعة الممتصة لكامل الجسم مع طاقة وتركيز النظائر المتساقطة في المنطقة المحددة. ويُحسب عادة معدل الجرعة لكامل الجسم عند مستوى الأرض الناتج عن أشعة بيتا (β) وفق المعادلة الآتية:

$$(١٢,٩) \quad \dot{D}_\beta^{air}(x) = 2.29 \times 10^{-3} \bar{E}_\beta \cdot X_\beta(x); \quad Gy/sec$$

حيث إن:

2.29×10^{-3} : ثابت تحويل الطاقة الممتصة

\bar{E}_β : متوسط طاقة أشعة β لكل تفكك (MeV/dis)

$X_\beta(x)$: تركيز النظائر المشعة التي تصدر أشعة بيتا (Ci/m^3)

يمكن الآن استنتاج معدل الجرعة المكافئة لكامل الجسم على النحو الآتي:

$$(١٢,١٠) \quad \begin{aligned} \dot{H}_\gamma^{intra}(x) &= 2.29 \times 10^{-3} f(d, E_{max}) X_\beta(x) \bar{E}_\beta \\ &\approx 2.29 \times 10^{-3} X_\beta(x) \bar{E}_\beta ; \quad Sv/sec \end{aligned}$$

أما معدل الجرعة في الهواء الناتج عن أشعة جاما (γ) فيُحسب وفق المعادلة الآتية:

$$(١٢,١١) \quad \dot{D}_\gamma^{air}(x) = 4.58 \times 10^{-3} \bar{E}_\gamma \cdot X_\gamma(x) ; \quad (Gy/sec)$$

حيث إن :

4.58×10^{-3} : ثابت تحويل الطاقة الممتصة.

\bar{E}_γ : متوسط طاقة أشعة جاما لكل تفكك (MeV/dis).

$X_\gamma(x)$: تركيز النظائر التي تصد أشعة جاما (Ci/m^3).

يمكن كذلك استنتاج معدل الجرعة المكافئة لكامل الجسم على النحو الآتي :

$$\begin{aligned} \dot{H}_\gamma^{tissue}(x) &= 4.58 \times 10^{-3} \bar{E}_\gamma X_\gamma(x) \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{tissue} / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \\ (12, 12) \end{aligned}$$

$$\approx 4.58 \times 10^{-3} \bar{E}_\gamma X_\gamma(x) \quad ; \quad (\text{Gy}/\text{sec})$$

يجب تصحيح معدل الجرعة المكافئة هذا ؛ لأن الشخص الذي على سطح الأرض لا يتعرض في الواقع إلا لنصف (2π) تدفق أشعة جاما من السحابة الإشعاعية. أما بالنسبة لأشعة بيتا فلا داعي للتصحيح ؛ لأن مدى اختراقها للمادة صغير. وهكذا يصبح معدل الجرعة المكافئة لكامل الجسم الناتج عن التعرض الخارجي لأشعة جاما على النحو الآتي :

$$(12, 13) \quad \dot{H}_\gamma^{tissue}(x) = 2.29 \times 10^{-3} \bar{E}_\gamma X_\gamma(x) \quad ; \quad \text{Sv} / \text{sec}$$

تُحسب الجرعة الممتصة لكامل الجسم بضرب معدل الجرعة في زمن التعرض للسحابة الإشعاعية ، وتُستعمل هذه الجرعة لتقدير الضرر العاجل (العلل والأعراض المرضية الأولية خلال السنة الأولى) والضرر الآجل (السرطان - والأمراض الجينية في النسل ، التي تظهر بين فترة تتراوح بين عشر وأربعين سنة).

(١٢, ٤, ٢, ٣) تقدير الجرعة المكافئة الداخلية (التنفس)

تُحسب الجرعة الممتصة الأولية للأعضاء الحساسة مثل الغدة الدرقية عند تعرضها للأيودين المشع في السحابة أو العظام عند تعرضها للسترونسيوم وفق المعادلة الآتية :

$$\dot{D}_{org} = 5.92 \times 10^3 \frac{\bar{E}}{M} \cdot F \cdot B \cdot X(x) \quad ; \text{Gy/sec}$$

$$D_{org} = \dot{D}_{org} \left[\frac{1 - \exp(-\lambda_e t)}{\lambda_e} \right] \quad ; \text{Gy}$$

(١٢,١٤)

حيث إن:

M: وزن العضو الحساس، (كيلوغرام).

 \bar{E} : متوسط الطاقة الصادرة لكل تفكك (MeV/dis). $\lambda_e = \lambda_\alpha + \lambda_\beta$ ثابت التفكك. علماً أن λ_x تمثل ثابت تفكك النظير المشع. و λ_α

تمثل ثابت تفكك التخلص البيولوجي للعضو من النظائر المشعة.

F: نسبة كمية النظير المشع الممتصة بالعضو الحساس.

B: معدل التنفس ($B = 2.31 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$).X(x): تركيز النظير المشع في الهواء (Curie/m^3).

t: زمن التعرض. (sec).

يعتمد حساب الجرعة المكافئة للعضو الناتجة عن تنفس المواد المشعة عن الجرعة

المتصدة والعامل الوزني للإشعاع W_R أو ما كان يسمى سابقاً عامل النوعية Q. وهكذا

تصبح معادلة معدل الجرعة المكافئة الداخلية على النحو الآتي:

$$\dot{H}_{org} = \dot{D}_{org} W_R \quad ; \text{Sv/sec}$$

(١٢,١٥)

حيث إن:

 W_R : عامل الوزن الإشعاعي، الذي يساوي واحداً بالنسبة للفتونات (X و γ)وأشعة بيتا β أيضاً.

(١٢,٤,٢,٤) تقدير الجرعة المكافئة الداخلية (الابتلاع)

يُقدر معدل الجرعة الممتصة الأولية للأعضاء الحساسة نتيجة أكل أو شرب

مواد ملوثة بالإشعاعات وفق المعادلة الآتية:

$$\dot{D}_{org} = 5.92 \times 10^{-3} \frac{\bar{E}}{M} \cdot F.B.C(t_0) \quad ; \text{ Gy/sec}$$

$$D_{org} = \dot{D}_{org} \cdot \left[\frac{1 - \exp(-\lambda_e t)}{\lambda_e} \right] \quad ; \text{ Gy}$$

(١٢, ١٦)

حيث إن :

5.92×10^{-3} : ثابت تحويل الطاقة الممتصة.

\bar{E} : متوسط الطاقة الصادرة لكل تفكك (MeV/dis).

$C(t_0)$: كمية الإشعاع في العضو عند الزمن t ، (μCi).

F : نسبة كمية النظير المشع الممتصة بالعضو الحساس.

M : وزن العضو الحساس (كيلوغرام).

t : زمن التعرض (sec).

أما معدل الجرعة المكافئة للعضو الحساس الناتجة عن ابتلاع مواد ملوثة إشعاعياً، فتُحسب وفق المعادلة العامة (١٢, ١٥) أيضاً.

(١٢, ٤, ٣) تدابير السلامة أثناء الحوادث النووية

تُصدر المنظمة الدولية للطاقة الذرية من حين إلى آخر كتيبات السلامة المعيارية التي تحتوي على توصيات السلامة للمنشآت النووية. وتوجد في هذه السلسلة من الكتيبات توصيات وجيهة تخص تدابير السلامة والإجراءات التي يجب اتباعها أثناء الطوارئ للحد من تعرض العاملين والجمهور والبيئة إلى تسرب إشعاعات أثناء الحوادث النووية المحتملة وتخفيفها. واتفق على تعريف (سلم) للحوادث النووية حسب خطورتها، وقُسم هذا (السلم) إلى ثمانية مستويات كما يلي :

أولاً : المستوى السابع : أسوأ حادث نووي أو (كارثة).

ثانياً : المستوى السادس : حادث نووي جدي (تسرب إشعاعي خارجي) يستدعي تطبيق حالة الطوارئ في المنطقة.

ثالثاً: المستوى الخامس: حادث تسرب إشعاعي محدود إلى خارج مبنى المحطة.
 رابعاً: المستوى الرابع: حادث تسرب إشعاعي داخل مبنى المحطة.
 خامساً: المستوى الثالث: حادث نووي جدي، تسرب إشعاعات قليلة لا تفوق المستوى المسموح به.
 سادساً: المستوى الثاني: حادث نووي، تسرب بسيط للإشعاعات داخل مبنى المحطة وتعرض له العاملين فقط.
 سابعاً: المستوى الأول: مرحلة ما قبل الحدث، تشغيل المحطة فوق طاقتها (ربما يسبب حادثاً نووياً).

ثامناً: مستوى الصفر: مرحلة التشغيل العادي، دون إجراءات خاصة.
 سنُعطي الآن فكرة عن أهم التوصيات الخاصة بتدابير السلامة إثر الحوادث النووية المحتملة ذات المستويات العالية (٥، ٦، ٧) والأقل احتمالاً أيضاً. وتحتوي خطة الطوارئ المعيارية إلى تقسيم منطقة المنشآت النووية مثل محطات القدرة النووية (المفاعلات) ومحطات تكرير الوقود المستعمل ومحطات تصنيع الوقود إلى منطقتين: تمتد المنطقة الأولى إلى أطرف دائرة نصف قطرها خمسة عشر كيلومتراً حول المحطة، أما الثانية فيمتد قطرها حوالي خمسة وسبعين كيلومتراً. ويُفضل أن تكون كثافة السكان في المنطقة الأولى صغيرة، بحيث يسهل إخلاؤهم عند الحاجة؛ وذلك لأنه كلما قرب سكان هذه المنطقة من المحطة زاد احتمال تعرضهم لسحابة التسرب الإشعاعي خاصة إذا كان موقعهم في اتجاه الريح عن طريق التنفس باستنشاق الغازات والغبار المشع. أما المنطقة الثانية فهي تتعرض في أسوأ الأحوال إلى التلوث الإشعاعي فقط، مما يستدعي الحظر على استهلاك الماء والمواد الغذائية المنتجة فيها؛ ولهذا فإن أكثر إجراءات الطوارئ تركز على المنطقة الأولى، وذلك بإبلاغ السلطات المعنية بكل الحوادث النووية وتطوراتها لكي تتمكن من أخذ القرارات اللازمة لتطبيق خطة الطوارئ المعدة

مسبقاً لكل حالة. وهكذا تتولى السلطات إعطاء التعليمات المناسبة للسكان سواء بالبقاء في المنازل أو المخايئ فترة مرور سحابة التسرب الإشعاعي، وتناول أقراص بوتاسيوم الأيودين أو إخلاء المنطقة إذا استدعى الأمر ذلك. ونذكر أن تناول هذه الأقراص لا يحمي من الإشعاعات بل يمنع تشبع الغدة الدرقية بالأيودين. ومن الإجراءات الوقائية عادةً تبليغ سكان المنطقة الأولى بخطة الطوارئ مسبقاً وتدريبهم عليها أحياناً لكي يتعرف كل شخص إلى ما يجب القيام به أثناء مرحلة الطوارئ. وتهدف خطة الطوارئ إلى ما يلي:

أولاً: حماية الجمهور من التعرض إلى جرعات إشعاعية تفوق الجرعات الإشعاعية المسموح بها.

ثانياً: الحد من الجرعة الممتصة وتخفيف الأضرار الإشعاعية للحوادث النووية.

ثالثاً: الالتزام بمبادئ ترجيح النفع عن الضرر أثناء تطبيق حالة الطوارئ.

(١٢,٥) الحوادث النووية

منذ بداية عصر الذرة في أربعينات القرن الماضي تعرضت عدة منشآت نووية إلى حوادث متفاوتة المستوى من أبسط الحوادث الإشعاعية إلى ما هو كارثي، مثل حادث مفاعل شرنوبل. وعلى الرغم من ذلك لا يزال هذا النشاط النووي قليل الضحايا مقارنةً بالصناعات الكيميائية أو النقل. ولقد أردنا في هذا الفصل - للعبارة - ذكر أربعة حوادث مهمة تركت بصماتها في مجال الطاقة النووية.

(١٢,٥,١) حادث محطة تصنيع الوقود

لقد حلت سنة ١٩٩٩م حادثة الكتلة الحرجة في محطة "توكامورا" باليابان أثناء تصنيع الوقود؛ وذلك نتيجة خطأ عاملين اثنين من الفنيين، بإضافتهما لكمية كبيرة من محلول يورانيل النيترات العالي الخصبية إلى وعاء الترسيب، الذي يحتوي أصلاً على

كمية من هذا المحلول. وأدت هذه العملية إلى الوصول إلى الكتلة الحرجة واندلاع التفاعل المتسلسل الذي أصدر كميات كبيرة من النيوترونات وأشعة جاما. وتعرض حينذاك العاملان بالإضافة إلى عامل ثالث بالقرب من غرفة العمليات إلى جرعات إشعاعية عالية جداً. وتعرض أيضاً عمال المحطة (حوالي ٣٠٠ شخص) إلى جرعات إشعاعية تفوق المستوى المسموح به ، وكذلك الحال بالنسبة لسكان المباني المجاورة في دائرة مساحتها ٣٥٠ متراً حول المحطة. أما سكان المنطقة المجاورة للمحطة في دائرة مساحتها خمسة عشر كيلومتر، فقد طلب منهم البقاء داخل المنازل لمدة يوم لكي يتسنى للقائمين بتشغيل المحطة إيقاف حادث الكتلة الحرجة هذا. وبعد فترة قصيرة تسبب هذا الحادث في موت العاملين على الرغم من العناية المركزة لهما بسبب الجرعات العالية (ما بين ٣,٨ إلى ٢٤ قراي) التي حصلوا عليها أثناء هذا الحادث.

(١٢,٥,٢) حادث محطة تكرير الوقود

أُكتشف خلال شهر أبريل سنة ٢٠٠٥م في محطة تكرير الوقود "صلافيلد- ثورب" الإنجليزية تسرب إشعاعي شديد نتج عن تسرب كمية كبيرة من سائل حامض النيتريك، الذي يحتوي على اليورانيوم والبلوتونيوم المذاب نتيجة كسر في أحد أنابيب خزان التكرير. ولم يُكتشف هذا التسرب إلا بعد شهور عندما تبين فقدان كمية كبيرة من بين الكميات الداخلة والكميات الخارجة أثناء عملية التكرير. وعلى الرغم من أن اكتشاف هذا التسرب أدى إلى إيقاف المحطة لبعض الوقت، إلا أنه لم يسبب ضرراً إشعاعياً للعاملين في المحطة ولا للجمهور؛ وذلك لأن السائل لم يتسرب إلى الخارج بل تسرب إلى خزان النفايات المدفون في الأرض والمصنع من الحديد غير القابل للصدأ داخل خزان من الأسمنت. ولقد صُنّف هذا الحادث بالمستوى الثالث في سلم الحوادث النووية، وتبين أن هذا الحادث ناتج عن إهمال أبسط إجراءات السلامة، وأساسيات المراقبة، والصيانة الدورية للمعدات.

(١٢,٥,٣) حادث مفاعل ثري مايل إيلاند (أمريكا)

يُعدُّ حادث مفاعل مايل إيلاند بولاية بنسلفانيا بأمريكا أسوأ حادث محطة نووية بأمريكا، حيث صُنِّف هذا الحادث بالمستوى الخامس. وتحتوي هذه المحطة على مفاعلين للماء المضغوط (PWR) من أكثر المفاعلات استخداماً في العالم. ولقد أدت سلسلة من الأعطال البسيطة والأخطاء في اتخاذ القرار غير المناسب إلى حادث امتصاص الحرارة في البداية الذي تطور إلى حادث فقدان تدفق سائل التبريد ثم ذوبان جزئي لقلب المفاعل الثاني (TMI-2) يوم ٢٥ مارس سنة ١٩٧٩م.

(١٢,٥,٣,١) حادث فقدان امتصاص الحرارة

بدأ حادث امتصاص الحرارة عند توقف مضخة ماء تغذية حلقة التبريد الثانية بين المكثف والمبادل الحراري، الأمر الذي خفض مستوى التبريد في أقل من ثانية، بسبب عطل في أحد خطوط تنظيف الماء من الأملاح والشوائب المعدنية. وأدى انخفاض تدفق الماء من هذه الحلقة إلى انخفاض امتصاص الحرارة في المبادل الحراري وارتفاع درجة الحرارة والضغط في حلقة التبريد الأولى. وعندما وصل الضغط القيمة القصوى المسموح بها (15.55 MPa) في المبادل الحراري، فُتح صمام الأمان أوتوماتيكياً بعد ثماني ثوانٍ من بداية الحادث، ثم تولى نظام التحكم إدخال قضبان التحكم لإخماد المفاعل بسبب الضغط العالي في دائرة التبريد الأولى.

(١٢,٥,٣,٢) حادث فقدان تدفق سائل التبريد

يحتاج قلب المفاعل للتبريد بعد إخماده؛ لأنه لا يزال ينتج حوالي سبعة بالمائة من قدرته الأصلية نتيجة تفكك المواد المشعة للوقود، إلا أن هذه العملية لم تتم كما ينبغي. وبعد حوالي ١٣ ثانية من إخماد المفاعل نزل الضغط إلى المستوى المطلوب (15.21 MPa)، لكن صمام الأمان لم يقفل، وتواصل تدفق ماء تبريد الحلقة الأولى خارج قلب المفاعل بدون علم طاقم الفنيين في غرفة التحكم. وهكذا تطور حادث

امتصاص الحرارة الأول إلى حادث فقدان تدفق سائل تبريد الحلقة الأولى. وعلى الرغم من أن نظام التبريد الاحتياطي اشتغل عند توقف مضخة ماء التغذية من البداية، إلا أن الماء لم يصل بالقدر الكافي للمبادل الحراري بسبب خطأ سابق عن الحادث، وهو قفل صمامين من صمامات دخول سائل التبريد الاحتياطي. ومما زاد الأمر تعقيداً أن هذا الأمر لم يكتشف إلا بعد ثماني دقائق من بداية الحادث وعند ذلك تم فتحهما. وبالإضافة إلى هذا تواصل تسرب ماء الحلقة الأولى عن طريق صمام أمان المبادل الحراري الذي لم يقفل في الوقت المناسب مما سبب تكوين أماكن فراغ (بخار) داخل حلقة التبريد الأولى وارتفاع مستوى سائل التبريد في المفاعل الحراري. وعندما وصل السائل إلى المستوى المطلوب تدخل فني التشغيل لإيقاف نظام التبريد الاحتياطي ظناً منه أن قلب المفاعل مغمور بسائل التبريد، إلا أنه في الواقع أصبح الجزء العلوي منه عكس ذلك. وهكذا بدأت درجة حرارة غلاف الوقود ترتفع بسرعة وتفاعل البخار مع الزيركينيوم مسبباً تكوين غاز الهيدروجين وتسرب المواد المشعة من الوقود الذي بدأ في الذوبان وارتفاع مستوى الإشعاع داخل مبنى المفاعل بسبب فيضان ماء تبريد الحلقة الأولى. وعند ذلك أكتشف أن صمام أمان المبادل الحراري لم يغلق (١٤٢ دقيقة بعد بداية الحادث) وتسرب كمية كبيرة جداً من سائل تبريد الحلقة الأولى. وتواصلت بعد ذلك جهود طاقم الفنيين والمهندسين في تشغيل مضخات الحلقة الأولى وتبريد قلب المفاعل وكُلت جهودهم في آخر المطاف بالنجاح والمحافظة على سلامة قلب المفاعل. وبعد ثلاث ساعات من بداية الحادث أدى تزايد ضغط البخار وغاز الهيدروجين في مبنى المفاعل إلى إعلان حالة الطوارئ خشية انفجار قبة المبنى وتسرب كمية كبيرة من الغازات والمواد المشعة إلى الخارج، إلا أن هذا لم يحصل بفضل الله ثم سماكة الحاجز البيولوجي، وأبعد الخطر نهائياً بعد خمسة أيام من بداية الحادث، التي تواصلت فيها الجهود لخفض ضغط المبنى تدريجياً وسحب غاز الهيدروجين ثم قفل المحطة نهائياً.

(٣,٣,٥,١٢) نتائج الحادث

قُدرت كمية الإشعاعات التي تسربت خلال هذا الحادث بأقل من واحد في المائة مما يحتويه المفاعل من مواد مشعة. ولم يحصل أي ضرر إشعاعي ملحوظ لا للعاملين في المحطة ولا للجمهور حولها، بحكم أن مستوى الإشعاع داخل دائرة خمسة عشر كيلومتراً لم يتجاوز ثمانين ملي رام. ولم يتعرض أي شخص إلى جرعة تفوق مائة ملي رام، أي ما يعادل جرعة صورة أشعة الصدر خلال الفحص الطبي.

كانت التكاليف المادية لهذا الحادث ضخمة بسبب إتلاف المفاعل وإيقافه نهائياً وتطهير المبنى الذي تواصل سنوات عديدة بعد الحادث. كذلك كان لهذا الحادث أثر نفسي كبير في إنتاج الطاقة النووية في العالم مما أدى بالولايات المتحدة الأمريكية لإيقاف برنامج بناء المفاعلات النووية حتى اليوم وتباطؤ هذه الصناعة في الدول الأخرى.

(٤,٥,١٢) حادث شرنوبل (أوكرانيا - روسيا سابقاً)

يُعدُّ حادث مفاعل شرنوبل بأوكرانيا في الاتحاد السوفيتي سابقاً سنة ١٩٨٦م أسوأ حادث محطة نووية على الإطلاق في العالم، حيث صُنِّفَ بالمستوى السابع (كارثة نووية). وتحتوي هذه المحطة على أربعة مفاعلات من أكبر المفاعلات النووية الروسية (RBMK)، التي تصل قدرتها الكهربائية إلى ألف ميغا وات (1000 MWE). ويتميز قلب هذا النوع من المفاعلات بالشكل الأسطواني الكبير ($\Phi = 7\text{ m}$ ، $\Phi = 12\text{ m}$) المكون من قوالب الجرافيت التي تتخللها قنوات ماء التبريد ومجموعات قضبان الوقود المخصب (٢-٣٪). وتعمل قوالب الجرافيت في هذا النوع من المفاعلات على تهدئة النيوترونات، أما الماء المغلي جزئياً، فوظيفته تبريد المفاعل وتهدئة النيوترونات. وأهم عيب لهذا النوع من المفاعلات هو أن معامل الفراغ (البخار) للفاعلية موجب، بمعنى أن ارتفاع درجة حرارة المبرد يؤدي إلى تكوين فراغات (جيوب فقاعات البخار) داخل قلب المفاعل، مما

يسبب امتصاصاً أقل للنيوترونات (فاعلية موجبة)، وارتفاعاً سريعاً في قدرة المفاعل يصعب التحكم في رحلتها إذا لم تُؤخذ التدابير اللازمة بسرعة فائقة لسلامة المحطة.
(١، ٤، ٥، ١٢) أهم خطوات الحادث

تقرر قبل الإيقاف الدوري للمفاعل الرابع بمحطة شرنوبل القيام بتجربة تهدف لتحسين السلامة، وذلك لمعرفة إمكانية استعمال القدرة الكهربائية المتبقية في زخم التربين لتشغيل محطة تبريد المفاعل في الشواري الأولى عند إيقافه فجأة؛ وذلك لأن المولدات الكهربائية لتشغيل نظام التبريد الاحتياطي تشغل بالديزل، وتحتاج لعدة ثوانٍ لتزويد نظام التبريد الاحتياطي بالقدرة اللازمة عند توقف المفاعل. وكان من المقرر إجراء هذه التجربة بعد تخفيض تدريجي لقدرة المفاعل حتى الثلث تقريباً. وبدأت فعلاً هذه العملية يوم ٢٥ أبريل، واتضح أثناء هذه العملية أن قدرة المفاعل انخفضت إلى مستوى متدنٍ جداً (30 MWE) نتيجة قمة تسمم المفاعل بالزيتون ^{135}Xe وعدم الالتزام بالتدرج الكافي في تخفيض قدرة المفاعل. حيثذاك أُخذ القرار برفع قدرة المفاعل عن طريق سحب مجموعة قضبان التحكم (فوق المستوى المعتاد) بدون مراعاة إجراءات السلامة. وعلى الرغم من هذا التدخل، فإن قدرة المفاعل وصلت فقط إلى 200 Mwe أي أقل من الثلث المطلوب لبدء التجربة. وعند الساعة ١٠:٠٥ شُغلت المضخة التي كان من المفترض تشغيلها، مما أدى إلى زيادة تدفق سائل التبريد أكثر من اللازم وخفض قدرة المفاعل من جديد، وعلجت بسحب يدوي لمجموعة أخرى من قضبان التحكم. هذه التدخلات الحاطة بسبب عدم فهم ما يحصل وتمويض وظيفة قضبان التحكم بزيادة تدفق سائل التبريد وتسمم الزيتون أدى بالمفاعل إلى حالة غير مستقرة.

عند الساعة ١٠:٢٣ بدأت التجربة المرتقة بإيقاف التريونة وربطها بمضخة التبريد الاحتياطي، الأمر الذي أدى إلى خفض تدفق ماء التبريد، وقللة امتصاص النيوترونات، وزيادة فقاعات البخار في قلب المفاعل (ما يعادل إدخال فعالية موجبة).

وعند ذلك بدأت رحلة زيادة قدرة المفاعل بسرعة فائقة لتصل خلال ثوانٍ نبضات القدرة إلى أضعاف القدرة القصوى المصممة للمفاعل.

عند الساعة ٤٠: ٢٣: ١ شُغِّل نظام إخماد المفاعل لكن السرعة البطيئة لإدخال قضبان التحكم (١٨-٢٠ ثانية) لم تتمكن من إخماده بل زادت من طرد كمية سائل التبريد، الأمر الذي أدى إلى نبضة كبيرة من الطاقة تسببت في كسر بعض قضبان التحكم ومساراتها، مما ساهم في عدم دخولها تماماً في قلب المفاعل، وقفزت القدرة إلى ما يفوق عشرة أضعاف القدرة القصوى المصممة للمفاعل.

عند الساعة ٤٧: ٢٣: ١ بدأ ذوبان قضبان الوقود وزيادة سريعة في ضغط البخار مما سبب انفجاراً كبيراً أزاح القبة الخرسانية لمبنى المفاعل وأدى إلى صعود البخار والغازات المشعة في الجو. ومما زاد الأمر تعقيداً تفاعل أكسجين الهواء مع الجرافيت الذي وصل إلى درجة حرارة عالية جداً، مسبباً حرائق ساعدت على تسرب الغبار المشع وتكوين سحابة مرت على كثير من المناطق المجاورة للمحطة ودول غرب أوروبا.

(٢, ٤, ٥, ١٢) إدارة أزمة الحادث

أثبتت إدارة أزمة هذا الحادث أن نظام السلامة والإجراءات اللازمة لاحتواء الحوادث النووية في المعسكر الروسي السابق قاصر ودون المعايير العالمية. ودلّ ارتكاب أخطاء فادحة من طرف طاقم الفنيين والمهندسين العاملين بالمحطة أثناء الحادث على قلة الخبرة والتدريب بالإضافة إلى التصميم غير السليم للمفاعل، مما تسبب أخيراً حدوث هذه الكارثة. لقد تجاهلوا مؤشرات مستوى الإشعاع، ولم يأخذوا بالتدابير اللازمة أثناء الحادث لحماية أنفسهم ورجال الإطفاء وسكان المنطقة. وعند اندلاع الحرائق دُعيت فرق الإطفاء لإخمادها دون ارتداء الملابس الواقية من الإشعاعات، ولم يتمكن رجال الإطفاء من السيطرة على الحرائق إلا بعد حوالي خمس ساعات تعرضوا خلالها إلى جرعات كبيرة من الإشعاعات. وتواصلت الجهود لإخماد حريق قلب المفاعل بإسقاط كميات كبيرة من التربة على قلب المفاعل باستخدام المروحيات،

وتعرض هؤلاء العمال للإشعاعات. وكذلك الحال بالنسبة للعمال الذين أُستدعوا بعد ذلك لإزالة التلوث الإشعاعي وبناء الثبوت الأسمتي للمفاعل. أما إخلاء السكان، فلم يتم إلا بعد مرور حوالي أربع وعشرين ساعة من بداية الحادث، مما ساهم في تعرضهم إلى جرعات تفوق بكثير الجرعات المسموح بها.

(٣، ٤، ٥، ١٢) نتائج الحادث

تسبب حادث شرنوبل إلى تعرض ٢٣٧ شخصاً أكثرهم من عمال المحطة ورجال الإطفاء إلى جرعات عالية من الإشعاعات مما أدى إلى وفاة ٣١ منهم خلال الأشهر الثلاثة التي تلت الحادث. وتم إخلاء ما يقرب من المائة وخمسة وثلاثين ألف نسمة من المناطق المجاورة للمحطة منهم خمسون ألف يمثلون جميع سكان المدينة المجاورة (بريبات)، التي تبعد ١٨ كم عن المحطة. وقدرت الجرعة التي تعرض لها سكان المنطقة المجاورة مباشرة ما بين 0.25 Sv و 0.5 وحوالي 100 mSv داخل دائرة منطقة الثلاثين كم حول المنطقة.

تفاوتت الجرعة المقدرة في الدول المجاورة لأكرانيا فكانت حوالي 4 mGy في بولندا و1 mGy في بقية أوروبا، ولم تسلم كل مناطق نصف الكرة الأرضية الشمالية من التلوث الإشعاعي، ولكنها كانت بمستويات أقل كلما ابتعدنا عن محطة شرنوبل. كما أدى هذا الحادث إلى تلوث التربة والماء حول المحطة إلى هجرة سكانها إلى مناطق أخرى، وأثبت بعض الدراسات تزايد سرطان الغدة الدرقية في المنطقة بحوالي ٢٢٪، أما نسبة أنواع السرطان الأخرى فهي متناقضة ومختلفة أحياناً من دراسة إلى أخرى.

لقد أوقف المفاعل رقم ٢ لمحطة شرنوبل سنة ١٩٩١م بسبب بعض المشاكل الفنية، أما المفاعل رقم ١ فأوقف سنة ١٩٩٦م والمفاعل رقم ٣ سنة ٢٠٠٠م. وهكذا أوقفت مفاعلات محطة شرنوبل نهائياً، إلا أن مشاكل المفاعل رقم ٤، الذي حصل فيه الحادث الخطير لم تنته بعد بسبب حالة الثبوت الواقي الذي وضع على عجل، ويحتاج إلى صيانة دائمة وإعادة بناء مكلفة ومراقبة دائمة لسنوات عديدة. وتأمل دولة أوكرانيا

حالياً الحصول على مساعدات دولية للقيام بإعادة البناء اللازم تحت إشراف المنظمات الدولية المتخصصة.

(١٢,٥,٥) حادث محطة فوكوشيما النووية اليابانية

ضرب زلزال كبير شرق ساحل اليابان يوم الجمعة ١١ مارس (أذار) ٢٠١١م على الساعة ٤٦ : ٠٢ وصلت قوته إلى ٩,٠ درجات على مقياس ريختر، مما أدى إلى اندلاع تسونامي يرتفع حوالي ١٥ متراً عند الشاطئ، الأمر الذي سبب أضراراً كبيرة في المنطقة. وكان مركز الزلزال على بعد ١٣٠ كيلومتراً قبالة ساحل مدينة سنداى في ولاية مياجي على شرقي جزيرة هونشو (الجزء الرئيس من اليابان). غمرت مياه التسونامي حوالي ٥٦٠ كيلومتراً مربعاً، وأسفرت عن تدمير جل الممتلكات ووفاة أكثر من ٢٥٠٠٠ شخصاً..

كانت تعمل في المنطقة حينذاك أحد عشر مفاعلاً موزعة في أربعة محطات للطاقة النووية، وعند وقوع الزلزال توقفت جميعها تلقائياً. أما محطة فوكوشيما النووية فكانت الأكثر تعرضاً لدمار التسونامي الذي حطم معظم أجزاء نظام التبريد. تحتوي هذه المحطة على ٦ وحدات، ثلاثة منها ٤-٦ لم تكن تعمل في ذلك الوقت لأعمال الصيانة العادية. تجدر الإشارة إلى أن مفاعلات محطة فوكوشيما هي من نوع مفاعلات الماء المغلي (BWR) صممتها شركة جنرال إلكتريك (GE) في سبعينات القرن الماضي وتصنع الشركات اليابانية توشيبا وهيتاشي. وبدأ التشغيل التجاري للمفاعلات ١-٣ على امتداد سنوات ١٩٨١-١٩٨٦م. أما قدرات المفاعلات فهي تساوي ٤٦٠ ميغاواط للوحدة ١، و٧٨٤ ميغاواط لوحدات ٢-٥، و١١٠٠ ميغاواط للوحدة السادسة، ٦.

يبدو أن المفاعلات ١-٣ التي كانت تشتغل أثناء الزلزال لم تتضرر بل توقفت تلقائياً عند حدوث تسارع أرضي من جراء الزلزال فاق مستوى التصميم. لكن تسبب هذا الزلزال في فقدان مصادر إمدادات الطاقة الكهربائية الستة الخارجية، الأمر الذي

أدى إلى تشغيل مولدات الديزل للطوارئ التي تقع في الطوابق السفلية من مباني التوربينات. كانت عملية التبريد الطارئة للمفاعلات تسير كما هو مصمم لها، حيث يتم تبريد بخار الدائرة الرئيسية بتجاوز التوربينات والمرور بالمكثفات لإزالة الحرارة المتولدة (حوالي ٣٪ من الطاقة الأولية) الناتجة عن تفكك المواد المشعة في داخل المفاعل بعد توقفه عن الشغل. لكن بواكر الكارثة بدأت بعد حوالي ساعة عندما ضرب التسونامي المحطة وحطم معظم أجزاء أنظمة التبريد الرئيسة والمساعدة.

(١٢,٥,٥,١) الساعات الأولى لحادث محطة فوكوشيما

أولاً: الساعة ٢٦: ٢ عصراً: حدث زلزال كبير بقوة ٩,٠ درجات على مقياس ريشر شرق ساحل اليابان يوم الجمعة ١١ مارس (أذار) ٢٠١١ مما أدى إلى توقف تلقائي لجميع المفاعلات النووية في المنطقة.

ثانياً: الساعة ٢٧: ٣ (بعد ٤١ دقيقة): ضربت موجة التسونامي الأولى الحاجز الواقى للمحطة المصمم لصد موجات تسونامي بارتفاع ستة أمتار، وتلتها لاحقاً بعد ثماني دقائق موجة ثانية كل منها أكبر ارتفاعاً من الحاجز. غمرت هذه الموجات ودمرت مضخات مياه البحر في دوائر التبريد الرئيسة والمساعدة وأغرقت أيضاً مولدات الديزل وغمرت المحركات الكهربائية، وكليهما يقع في الطوابق السفلية من مباني التوربينات. وحطمت موجات التسونامي أيضاً العديد من الهياكل ومضخات مياه البحر، والخزانات داخل مباني التوربينات وعطلت جميع مولدات الديزل، والمحركات الكهربائية ماعداً واحدة. أما خارج المحطة فقد تسببت موجات التسونامي في قطع جميع الطرق المؤدية للمحطة، حيث أصبح من الصعب الوصول إليها.

ثالثاً: الساعة ٦: ٠٠: انخفاض منسوب المياه في المفاعل ١ حيث وصل إلى أعلى قضبان الوقود، وبدأت درجة الحرارة في الارتفاع بسبب الأعطال في نظام تبريد حالات الطوارئ. وبعد ساعة واحدة ونصف أصبح الوقود غير مخمور تماماً بالماء الذي تبخر معظمه. وهكذا بدأ انصهار الجزء الأوسط من الوقود تدريجياً لعدم كفاءة نظام التبريد.

رابعاً: الساعة ٠٣: ٧ مساءً: أعلنت حالة الطوارئ النووية في المنطقة المجاورة وأصدرت ولاية مياجي في محافظة فوكوشيما أمر إجلاء السكان إلى حدود ٢ كم من المحطة في الساعة ٠٥: ٨. ومددت منطقة الإجماء إلى ٣ كم عند الساعة ٢٣: ٩، ثم إلى ١٠ كلم عند الساعة ٤٤: ٥ يوم السبت ١٢ مارس (أذار). وعند ٢٥: ٦ من مساء يوم السبت مددت السلطات من جديد منطقة الإجماء إلى ٢٠ كيلومترا.

توقف نظام التبريد في مفاعلات فوكوشيما ١-٣ بسبب موجات التسونامي التي دمرت الجزء الرئيسي من نظام تبريد الحالات الطارئة الأمر الذي وضع هذه المفاعلات في حالة خطرة. كذلك بدأت مخاوف عن مخازن الوقود المستهلك في أعلى الوحدة ٤ التي بدأ مستوى ماء التبريد فيها ينخفض تدريجياً بسبب فقدان التيار الكهربائي. وأدى انصهار وقود المفاعلات ١-٣ في الأيام الثلاثة الأولى إلى إنتاج الهيدروجين، وتزايد الضغط في مباني هذه المفاعلات الأمر الذي أدى إلى انفجار السقف العلوي للمفاعل ١ و٣. وصُنّف هذا الحادث مؤقتاً بمستوى ٥ ثم بعد ذلك بالمستوى ٧ وهو أعلى مستوى على مقياس الحوادث النووية، وذلك بسبب التسرب الإشعاعي الكبير الذي حصل في الأيام القليلة الأولى. لكن بعد أسبوعين كانت المفاعلات الثلاثة (وحدات ١-٣) مستقرة نتيجة التدخل النشط للحد من التلوث الإشعاعي، رغم عدم التمكن من إعادة نظام تبريد الطوارئ تماماً لإزالة حرارة التفكك الإشعاعي.

(٢, ٥, ٥, ١٢) الأيام الأولى لحادث محطة فوكوشيما

أولاً: المفاعل الأول: يُعتقد بصورة مؤقتة الآن، أن منسوب المياه انخفض إلى أعلى الوقود بعد حوالي ثلاث ساعات (الساعة ٦) من إخماد المفاعل، ثم بعد ساعة ونصف أصبح الوقود غير مغمور بالماء بسبب تعطل نظام التبريد. وعند ذلك بدأ ارتفاع درجة حرارة الوقود إلى درجة ذوبانه حوالي ٢٨٠٠ درجة مئوية، وبعد ١٦ ساعة (يوم السبت الساعة ٠٠: ٧) أنصهر أكثر الوقود وسقطت الكتل المنصهرة في مياه الجزء السفلي من مبنى المفاعل. وأدى انصهار الوقود إلى تضاعف الضغط داخل هياكل

الاحتواء في وقت مبكر يوم السبت الأمر الذي استدعى التنفيس لخفض الضغط. ورغم ذلك حدث انفجار في طابق الخدمة يوم السبت على الساعة ٣:٣٦ مما أدى إلى نسف السقف العلوي لمبنى المفاعل ١. وبعد ذلك، أصبح من الضروري حقن مياه البحر في أوعية ضغط المفاعل باستخدام مضخات خارجية في الساعة ٨:٢٠ من نفس اليوم لتخفيض الضغط وتبريد المفاعل.

ثانياً: المفاعل الثاني: تعطل نظام التبريد الأساسي لحالات الطوارئ يوم الجمعة على الساعة ٤:٣٦ وتُشير التحاليل الأولية إلى أن تسرب الماء من وعاء الضغط العالي للمفاعل حصل في حوالي منتصف يوم السبت أي بعد ٢١ ساعة من وقوع الزلزال. واشتغل نظام تبريد عزل بخار قلب المفاعل حتى صباح يوم الاثنين ١٤ مارس (أذار)، ثم تعطل وانخفض بعد ذلك مستوى المياه بسرعة ليصبح الوقود غير مغمور وبدأ انصهار الوقود عند حوالي الساعة ٨ مساءً. والمفهوم وقتياً الآن، أن الكثير من الوقود المنصهر سقط في المياه السفلية لمبنى المفاعل الأمر الذي أوجب تنفيس الضغط يوم ١٣ ويوم ١٥ وكذلك فتح لوحة التنفيس في أعلى المبنى لتجنب تكرار انفجار الهيدروجين، كما حصل للمفاعل ١. ومن المتوقع أن الانخفاض المفاجئ الذي حصل مبكراً يوم الثلاثاء ١٥ في الغرفة السفلية للمفاعل ناتج عن انفجار للهيدروجين هناك، الأمر الذي تسبب أيضاً في تسرب كبير للمواد المشعة.

ثالثاً: المفاعل الثالث: فشل نظام التبريد العازل لقلب المفاعل في الساعة ١١ من صباح يوم السبت، وتم تخفيض الضغط بالتنفيس في وقت متأخر من ذلك اليوم. وبعد ذلك تعطل حقن المياه باستخدام نظام تبريد حالات الطوارئ على الساعة ٥:١٠ من يوم الأحد. وحينذاك بدأ انخفاض منسوب المياه في قلب المفاعل وظهرت بوادر انصهار الوقود عند الساعة ٩ صباحاً مما أوجب تكرير عملية التنفيس من جديد. والمفهوم وقتياً الآن، أن جل الوقود ذاب في صباح يوم الأحد وسقطت الكتل المنصهرة في مياه الجزء السفلي من وعاء الضغط للمفاعل. وتكررت عملية التنفيس يوم الاثنين على الساعة

٢٠:٥٥ صباحاً، الأمر الذي نقل كل الغازات إلى الطابق العلوي من المبنى، وعلى الساعة ١١:٠١ وقع انفجار كبير للهيدروجين هناك نسف السقف وبعض الجدران وهدم الجزء العلوي من المبنى تماماً. وترك هذا الانفجار الكثير من الحطام وانثرت المواد المشعة بكثرة حول موقع المفاعل الثالث، أما مدى الضرر الذي حصل لوعاء ضغط المفاعل فيصعب تقويمه حالياً.

رابعاً: المفاعل الرابع: دُمر الجزء العلوي من المبنى، وألحق أيضاً أضراراً في البنية الفوقية المجاورة لمبنى المفاعل الثالث. وبما أن المفاعل الرابع لم يكن يشتغل في تلك الفترة فإن جل متاعب هذه الوحدة كان ناتجاً عن ارتفاع درجة حرارة مخازن الوقود المستهلك في أعلى المبنى، لكن يبدو أن الانفجار الذي حصل في هذه الوحدة كان ناتجاً عن تسرب الهيدروجين إليها أثناء تنفيس ضغط المفاعل ٣ من خلال القناة المشتركة للوحدتين. وتسببت هذه الانفجارات في تسرب كميات كبيرة أيضاً من الغازات والمواد المشعة ولا سيما اليود والسييزيوم.

خامساً: برك الوقود: يحتاج الوقود المستخدم إلى تبريد وحواجز مائية للحماية من الإشعاع تتمثل في برك عميقة يُخزن فيها الوقود المستهلك. وبعد نحو ثلاث سنوات تحت الماء، يمكن نقل الوقود إلى مكان التخزين الجاف وتبريده عن طريق التهوية بالحمل الحراري. يُنتج الوقود المستهلك كميات كبيرة من الحرارة يجب امتصاصها وتصريفها عن طريق دوائر التبادل الحراري الخارجية، وذلك بواسطة مضخات كهربائية للمحافظة على درجة حرارة منخفضة لماء البركة.

توجد برك وقود في أعلى كل مباني المفاعلات الستة لمحطة فوكوشيما، حيث يمكن تفريغ الوقود المستهلك وتحميل الوقود الجديد تحت الماء أثناء فتح وعاء الضغط للمفاعل ونقل الوقود دائماً تحت الماء بطريقة آمنة. عند انقطاع التيار الكهربائي توقفت مضخات دوائر التبادل الحراري الخارجية، وحينذاك بدأت تظهر بعض المشاكل في أحواض برك الوقود المستهلك وخاصة التي توجد في أعلى مبنى المفاعل الرابع الذي تم

ملؤه منذ أشهر فقط. وبعد انفجار الهيدروجين في هذه الوحدة إندلح حريق وارتفع مستوى الإشعاع بالقرب من المبنى ليصل إلى حوالي ٤٠٠ ملي سيفرت / ساعة، ولم يتم اخماد الحريق إلا بعد ثلاث ساعات. لذا، كان التركيز من يوم الثلاثاء ١٥ مارس (أذار) على تجديد المياه في الأحواض لكل الوحدات، وذلك عن طريق ضخ مياه البحر بمضخات حريق كبيرة في البداية لكن من ٢٢ مارس (أذار) استعملت مضخات الإسمنت الطويلة التي تتميز بأكثر دقة لتوجيه المياه من خلال الجدران المتضررة من الطوابق العلوية لمباني المفاعلات.

سادساً: التسرب الإشعاعي: أفادت الوكالة الدولية للطاقة الذرية في ١٩ مارس (أذار) أن مستويات الإشعاع في الهواء ارتفعت إلى ثلاث مرات منذ وقوع الزلزال، لا سيما في وقت مبكر يوم ١٥ (٤٠٠ ملي سيفرت/ساعة بالقرب من الوحدة الثالثة). وانخفض بعد ذلك ليستقر منذ ١٦ مارس (أذار) عند مستويات أعلى من المستويات العادية، لكن ضمن النطاق الذي يسمح بمواصلة العمل في الموقع للسيطرة على الأحداث. وعلى سبيل المثال، فإن معدل الجرعة كان حوالي ١٢ ملي سيفرت/ساعة على حدود المحطة في وقت مبكر يوم ١٤، ثم ٤، ٣ ملي سيفرت/ساعة في منتصف يوم ١٦، وانخفض إلى ٠,٦٥ ملي سيفرت/ساعة، بعد ١٣ ساعة في وقت لاحق في نفس النقطة. وفي وقت متأخر يوم ٢٤ مارس (أذار) كان حوالي ٠,٢ ملي سيفرت/ساعة عند البوابة الأمامية، بعد أن كانت عشرة أضعاف هذا قبل بضعة أيام. وفي يوم ١٧ أبريل أصبحت معدلات الجرعة في ثمانية نقاط للرصد تتراوح بين ٠,٠١ ملي سيفرت/ساعة عند الحدود الشمالية وحوالي ٠,١٩ ملي سيفرت/ساعة عند الحدود الجنوبية للمحطة.

(١٢,٥,٥,٣) ملخص الحادث بعد ثلاثة أشهر

انصهرت كميات كبيرة من وقود المفاعلات ١-٣ خلال الأيام الثلاثة الأولى للحادث رغم الجهود الكبيرة التي بذلت لاحتواء هذا الحادث النووي. ولقد بقيت كل

المواد المشعة داخل وعاء الضغط والغرف السفلية ما عدا بعض الغازات والغببار المشع الذي تسرب أثناء التنفيس اللازم للوحدات أو ما تسرب مع الماء من الوحدة الثانية حيث من الواضح أن وعاء الضغط هناك تضرر وأصبح احتواء المواد المشعة فيه مشكوكاً فيه. لا تزال عملية التبريد حتى الآن تعتمد على المصادر الخارجية، وذلك باستخدام المياه المعالجة الآن، في حين يستمر العمل لإنشاء نظام تبريد مستقر لإزالة الحرارة من المفاعلات المتضررة إلى مبادلات حرارية خارجية. لقد انخفضت درجات الحرارة في الجزء السفلي من أوعية الضغط للمفاعلات والحالة مستقرة الآن. وقد تمكنت فرق العمل من الوصول إلى جميع مباني المفاعلات الثلاثة، لكن لا تزال معدلات الجرعة الإشعاعية داخلها عالية ولا تسمح بالبقاء هناك طويلاً. ويجري من حين إلى آخر ضخ النيوترونات في جميع أوعية احتواء المفاعلات المتضررة لتفادي انفجارات الهيدروجين.

(١٢,٥,٥,٤) ملخص الحادث بعد ستة أشهر

تجمعت كميات كبيرة من المياه الملوثة التي تراكمت في الموقع منذ الحادث لكنها في تناقص مُطرد منذ بداية معالجتها باستخدام المحطة الجديدة التي تم إنشاؤها في حزيران، واستخدام تلك المياه من جديد في دوائر التبريد. وعلى الرغم من أن الوحدة الأولى لمعالجة المياه الملوثة تعمل كما ينبغي، فقد تقرر زيادة وحدة جديدة في نهاية شهر تموز. لقد تسربت كميات من المواد المشعة للبحر لكن معظمها له مستوى إشعاعي منخفض لم يكن لها أي تأثير كبير مباشر خارج هياكل المحطة، وأصبح المستوى الإشعاعي خارج المحطة منذ أبريل (نيسان) دون المستوى المسموح به عادة. وبصرف النظر عن عملية التبريد المتواصلة، فالمهمة الأساسية الآن تتركز في احتواء تسرب المواد المشعة من مباني المفاعلات، ولا سيما الكميات الكبيرة من المياه الملوثة التي تسربت من الوحدات الثلاث، والآن في انتظار المعالجة. وتجدر الإشارة إلى عدم تسجيل أي حالة وفاة أو أمراض ناجمة عن الإشعاع نتيجة هذا الحادث النووي الخطير حتى الآن.

(١٢,٦) التصميم الهندسي لسلامة المحطات النووية

نشط التعاون الدولي بعد حادث شرنوبل فكانت جمعيات مثل الجمعية الدولية لمشغلي المحطات (WANO) سنة ١٩٨٩ م، وكانت الموافقة الدولية على ميثاق السلامة النووية تحت إشراف الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) سنة ١٩٩٢ م. وتعمل هذه الهيئات الدولية على تضافر الجهود والتعاون لتحسين سلامة المحطات القائمة، وتبادل الخبرات، والعمل على تصميم أكثر سلامة لمفاعلات الأجيال القادمة. وتُشجع هذه الهيئات الدولية على التصاميم التي تنهى مبدأ السلامة السلبية (الطبيعية التي تعتمد على القوانين الفيزيائية)، وكذلك على مبدأ السلامة الفعّالة وأحدث التقنيات لتحسين سلامة المحطات النووية.

(١٢,٦,١) السلامة الفعّالة

تعتمد السلامة الفعّالة للمحطات النووية على النظم الهندسية سواء كانت كهربائية أو ميكانيكية والمصممة للتحكم في العمليات، مثل نظام التبريد الاحتياطي لتفادي حوادث امتصاص الحرارة أو فقدان تدفق سائل التبريد. وكذلك ربط المحطة بأكثر من منطقة توزيع للكهرباء وتوفير مولدات احتياطية تشتغل بالديزل أتوماتيكياً عند انقطاع التيار الكهربائي عن المحطة لمنع توقف المعدات وأجهزة القياس في كل الأحوال. وفي هذا المجال تطورت ثقافة السلامة منذ عهد الجيل الأول للمفاعل فأضيفت حواجز متتالية يصل عددها أحياناً إلى خمسة لأحدث المفاعلات ابتداءً من غلاف الوقود وانتهاءً بالحاجز البيولوجي المتمثل في مبنى المفاعل المصنع من الإسمنت المسلح وبمواصفات عالية قادرة على تحمل الضغط العالي ومنع تسرب المواد المشعة عند الحوادث. ولقد أثبتت هذه التدابير جدواها أثناء حادث مفاعل ثري مايل أيلاند حيث صمد الحاجز البيولوجي ومنع تسرب المواد المشعة بكميات كبيرة إلى البيئة على الرغم من ذوبان جزئي لقلب المفاعل.

(٢، ٦، ١٢) السلامة السلبية (الطبيعية)

تُعرف سلامة المحطات النووية السلبية بالتصميمات الهندسية التي تعمل على الاستفادة القصوى من القوانين الفيزيائية لسلامة المفاعل، مثل قوانين الجاذبية، وتمدد المواد، والحمل الحراري، وامتصاص النيوترونات عند ارتفاع درجة قلب المفاعل بحيث يعتمد المفاعل تلقائياً بدون تدخل آلي أو يدوي.

لقد صُمم مفاعل الجيل الثالث على أساس السلامة السلبية، ومنها الآن ما هو تجريبي وبعضها الآخر وصل مرحلة الإنشاء أو التشغيل في بعض الدول مثل فرنسا، وفنلندا، واليابان، وكوريا الجنوبية؛ ولهذا الغرض صمم وضع خزان كبير فوق قلب مفاعل الماء المضغوط والمغلي، يُفتح تلقائياً بدون حاجة لمضخات احتياطية تشتغل بالكهرباء بحيث يغمر سائل الخزان (الماء والبورون) قلب المفاعل عندما يرتفع الضغط أثناء حادث فقدان تدفق سائل التبريد. ويتواصل عند ذلك امتصاص حرارة المفاعل عن طريق الحمل الحراري الطبيعي؛ لأن تبخر الماء المنهمر يصعد من جديد فيتكثف في أعلى المبنى بالخزان ويعود من جديد لتبريد المفاعل وتتواصل هذه الدورة بطريقة طبيعية لسلامة المحطة.

لا تزال مفاعلات الجيل الثالث الحرارية الأخرى، مثل المفاعلات شديدة الحرارة (HTR) المبردة بغاز الهيليوم، أو المفاعلات المبردة بالمعادن الذائبة في مراحل التصميم والتجربة. ويكون الوقود في هذه المفاعلات على شكل كريات صغيرة الحجم، أو على شكل معدني مما يساعد على إيقاف التفاعل وإخماد المفاعل تلقائياً بمجرد ارتفاع شديد للحرارة بسبب تمدد الوقود. وكذلك الحال بالنسبة لمفاعلات النيوترونات السريعة المبردة بالصوديوم المستقبلية التي تشتغل تحت الضغط العادي بدون إجهاد المعدات، حيث يوضع قلب المفاعل داخل حوض كبير من الصوديوم. وأدت بعض التجارب الأولية على هذا النوع من المفاعلات إلى ارتفاع الحرارة المفرط

عند فقدان تدفق سائل التبريد، يؤدي إلى إيقاف المفاعل تلقائياً بسبب تمدد الوقود المعدني. أما تبريد المفاعل بعد إخماده فيكون عن طريق الصوديوم، الذي يتمتع بدرجة غليان عالية (٩٠٠°)، الأمر الذي يمكنه من امتصاص كميات كبيرة من الحرارة دون الحاجة إلى إضافة كميات جديدة لحوض المفاعل. وبشكل عام، فإن التصميمات الهندسية للسلامة السلبية غير مكلفة وآمنة وستؤدي دوراً أساسياً في سلامة المحطات النووية المستقبلية في كل الدول النووية.

(١٢,٧) تقارن

- ١- اذكر أهم مبادئ السلامة في المحطات النووية.
- ٢- اشرح باختصار كيفية تحليل الحوادث النووية مسبقاً، مع ذكر أهم الحوادث المحتملة.
- ٣- كم مستوى لسلم الحوادث النووية، وما هو المستوى الذي يستدعي تطبيق خطة طوارئ معدة مسبقاً؟
- ٤- اذكر المبادئ الثلاثة التي تركز عليها خطة الطوارئ لمواجهة الحوادث النووية.
- ٥- اشرح باختصار أهم أسباب حوادث مفاعلي تري مايل أيلاند بأمريكا وشرنوبل بأوكرانيا - روسيا سابقاً.
- ٦- استناداً إلى نموذج انتشار النظائر المشعة وتشتتها، ثم أشكال معامل التشتت الأفقي والعمودي والأحوال الجوية A, B, C و، علماً أن سرعة الرياح حوالي $\bar{u} = 1 \text{ m/sec}$ أوجد ما يلي:
 - أ) ارسم منحنى تركيز المواد المشعة ابتداءً من ١٠٠ متر إلى ١٠ كم حول منطقة التسرب إذا كان ارتفاع المدخنة حوالي ٥٠ متراً.

(ب) استنتج معادلة لحساب مكان أقصى تركيز للمواد المشعة؟
 (ج) احسب مكان أقصى تركيز للمواد المشعة عندما تكون الأحوال الجوية السائدة متوسطة الاضطراب (B).

٧- كمية غاز الزينون ^{135}X المتسربة سنوياً من مدخنة مفاعل نووي للماء المضغوط (PWR) تساوي $1.5 \times 10^3 \text{ Ci/year}$ ، إذا كان ارتفاع المدخنة 100 متر والأحوال الجوية السائدة مستقرة (F) ومتوسط سرعة الرياح 1.5 m/sec تقريباً، علماً أن متوسط الطاقة الصادرة عن هذا الغاز هي $\bar{E}_\beta = 0.146 \text{ MeV}$ و $\bar{E}_\gamma = 0.03 \text{ MeV}$ فأوجد ما يلي:
 (أ) تركيز هذا الغاز في نقطة تبعد 5 كم على المحطة.

(ب) الجرعة الممتصة خارجياً على مستوى سطح الأرض عند النقطة المحددة (تبعد 5 كم على المحطة).

٨- كمية غاز الأيودين ^{131}I المتسربة من مدخنة طولها 30 متراً لمفاعل نووي للماء المغلي (BWR) تساوي سنوياً 1.23 Ci/year . استنشاق هذا الغاز المشع يجعله يتركز خاصة في الغدة الدرقية (وزنها حوالي 20 غراماً للشخص البالغ). فإذا افترضنا أن الأحوال الجوية السائدة مستقرة (E) ومتوسط سرعة الرياح تساوي 1.2 m/sec ، علماً أن:
 $F = 0.24$ ويوم $T_{1/2}(\text{h}) = 138$ ويوم $T_{1/2} = 8.04$ فأوجد ما يلي:

(أ) الجرعة الداخلية المكافئة التي يحصل عليها شخص يسكن على بعد 2 كم من المحطة.

(ب) الجرعة الداخلية المكافئة التي يحصل عليها هذا الشخص سنوياً.

٩- أثناء حادث لإحدى محطات القدرة النووية تسربت كميات من الغازات والمواد المشعة خارج مبنى المحطة. ووجد قياسياً بعد أسبوع من الحادث أن تركيز عنصر السيزيوم ^{137}Cs على سطح الأرض وعلى بعد نصف كم من المحطة يساوي 0.0001 Ci علماً أن:

$T_{1/2} = 30.0 \text{ year}$, $E_{\gamma} = 0.66 \text{ MeV}$ فاحسب ما يلي :

(أ) معدل الجرعة الممتصة (msv/hr) على ارتفاع مستوى متر واحد.

(ب) معدل الجرعة الممتصة (msv/hr) في الموقع نفسه بعد خمس سنوات.

١٠- إثر حادث المحطة النووية شرنوبل تم قياس تركيز عنصر الأيودين ^{131}I في

حليب البقر في إحدى المناطق المجاورة نتيجة تلوث العشب فوجد أنه يساوي $\mu \text{ Ci}$

7.5×10^{-6} . وإذا افترضنا أن متوسط استهلاك الحليب يومياً حوالي نصف لتر للطفل،

علماً أن متوسط وزن الغدة الدرقية للأطفال حوالي غرامين ومتوسط الطاقة الإشعاعية

المتتصة تساوي $E = 0.23$ و $T_{1/2} = 8.04 \text{ day}$ و $T_{1/2}(5) = 138 \text{ day}$ ، فاحسب ما يلي :

(أ) كمية الإشعاعات المستهلكة يومياً ($\mu \text{ ci}$).

(ب) الجرعة المكافئة السنوية عند تناول هذا النوع من الحليب.

(ج) قارن هذه الجرعة بالجرعة القصوى المسموح بها $\text{MPD} = 15 \text{ msv/year}$. ثم ما

استنتاجاتك؟

الملاحق

- ملحق رقم (١). الثوابت الفيزيائية الأساسية •
- ملحق رقم (٢). معامل التحويل بين الوحدات
- الفيزيائية • ملحق رقم (٣). بعض خصائص
- العناصر الطبيعية • ملحق رقم (٤). معامل التوهين
- الكتلي لأشعة جاما • ملحق رقم (٥). معامل
- الإمتصاص الكتلي لأشعة جاما • ملحق رقم (٦).
- المقطع العرضي المجهري • ملحق رقم (٧). المقطع
- العرضي المجهري والمجهري للنيوترونات الحرارية

ملحق رقم (١). الثوابت الفيزيائية الأساسية.

القيمة	الرمز	الثابت
$2.997924 \times 10^8 \text{ m, s}^{-1}$	C	سرعة الضوء
$1.602176 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$	e	شحنة الإلكترون
$1.660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ($931.494 \text{ MeV} / c^2$)	u	وحدة الكتلة الذرية
$9.109382 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $5.486 \times 10^{-4} u = 0.511 \text{ MeV} / c^2$	m_e	كتلة الإلكترون
$1.672622 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $1.007276 \times 10^{-4} u = 938.272 \text{ MeV} / c^2$	m_p	كتلة البروتون
$1.674927 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $1.008665 \times 10^{-4} u = 939.565 \text{ MeV} / c^2$	m_n	كتلة النيوترون
$6.022142 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	N_a	عدد أفوغادرو
$6.626069 \times 10^{-34} \text{ J.sec}$ $4.135667 \times 10^{-15} \text{ ev.sec}$	h	ثابت بلانك
$1.380650 \times 10^{-23} \text{ J.k}^{-1}$ $8.617342 \times 10^{-5} \text{ ev.k}^{-1}$	k	ثابت بولزمان
$8.854188 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$	ϵ_0	ثابت الكهرباء

المرجع: <http://physics.nist.gov>

ملحق رقم (٢). معامل التحويل بين الوحدات الفيزيائية.

معامل الضرب للتحويل	الوحدة
$1.602189 \times 10^{-19} \text{ Joule}$	<i>eV</i>
10^6	<i>MeV</i>
931.494 MeV	<i>amu</i>
1 J/sec	<i>W</i>
$1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$	<i>Gy</i>
$100 \text{ erg/g} = 0.01 \text{ Gy}$	<i>rad</i>
100 rem	<i>Sv</i>
10^{-24} cm^2	<i>barn</i>
$3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$	<i>Ci</i>
86400 sec	<i>day</i>
$365 \text{ day} = 31536 \times 10^7 \text{ sec}$	<i>year</i>
$8.617065 \times 10^{-5} \text{ eV}$	<i>K</i>
273 K	0°C
57.30°	<i>radian</i>

ملحق رقم (٣). بعض خصائص العناصر الطبيعية [المرجع: ١]

Z	El	Atomic Weight	Mass density (g/cm ³)	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Elemental Abundances		
						Solar System (%)	Crustal Average (mg/kg)	Earth's Oceans (mg/L)
1	H	1.00794	0.0708	-259.34	-252.87	91.0	1400	1.08×10 ⁵
2	He	4.002602	0.124901	-272.2	-268.93	8.9	0.008	7×10 ⁻⁶
3	Li	6.941	0.534	180.5	1342	1.86×10 ⁻⁷	20	0.18
4	Be	9.012182	1.85	1287	2471	2.38×10 ⁻⁹	2.8	5.6×10 ⁻⁶
5	B	10.811	2.37	2075	4000	6.9×10 ⁻⁸	10	4.44
6	C ^a	12.0107	2.2670 ¹⁹	4492 ¹	3842 ⁶	0.033	200	28
7	N	14.00674	0.807	-210.00	-195.79	0.0102	19	0.5
8	O	15.9994	1.141	-218.79	-182.95	0.078	4.61×10 ⁵	8.57×10 ⁵
9	F	18.9984032	1.50	-219.62	-188.12	2.7×10 ⁻⁶	585	1.3
10	Ne	20.1797	1.204	-248.59	-248.08	0.0112	0.006	1.2×10 ⁻⁴
11	Na	22.989770	0.97	97.80	883	0.000187	2.36×10 ⁴	1.08×10 ⁴
12	Mg	24.3050	0.74	650	1090	0.00350	2.33×10 ⁴	1290
13	Al	26.981538	2.70	660.32	2519	0.000277	8.23×10 ⁶	0.002
14	Si	28.0855	2.3296	1414	3285	0.00326	2.82×10 ⁵	2.2
15	P	30.973761	1.82	44.15	280.5	3.4×10 ⁻⁶	1050	0.86
16	S	32.066	2.067	115.21	444.60	0.00168	350	905
17	Cl	35.4527	1.56	-101.5	-34.04	1.7×10 ⁻⁵	145	1.94×10 ⁴
18	Ar	39.948	1.396	-189.35	-185.85	0.000329	3.5	0.45
19	K	39.0983	0.89	63.38	759	1.23×10 ⁻⁵	2.09×10 ⁴	399
20	Ca	40.078	1.54	842	1484	0.000199	4.15×10 ⁴	412
21	Sc	44.955910	2.99	1541	2836	1.12×10 ⁻⁷	22	6×10 ⁻⁷
22	Ti	47.867	4.5	1668	3287	7.8×10 ⁻⁶	5650	0.001
23	V	50.9415	6.0	1910	3407	9.6×10 ⁻⁷	120	0.0025
24	Cr	51.9961	7.15	1907	2671	4.4×10 ⁻⁶	102	3×10 ⁻⁴
25	Mn	54.938049	7.3	1246	2061	3.1×10 ⁻⁵	950	2×10 ⁻⁴
26	Fe	55.845	7.875	1538	2861	0.00294	5.63×10 ⁴	0.002
27	Co	58.933200	8.86	1495	2927	7.3×10 ⁻⁶	25	2×10 ⁻⁵
28	Ni	58.6934	8.912	1453	2913	0.000161	84	5.6×10 ⁻⁵
29	Cu	63.546	8.933	1084.62	2562	1.70×10 ⁻⁶	60	2.5×10 ⁻⁴
30	Zn	65.39	7.134	419.53	907	4.11×10 ⁻⁶	70	0.0049
31	Ga	69.723	5.91	29.76	2204	1.23×10 ⁻⁷	19	3×10 ⁻⁵
32	Ge	72.61	5.323	938.25	2839	3.9×10 ⁻⁷	1.5	5×10 ⁻⁵
33	As	74.92160	5.776 ²⁰	817 ⁴	614 ⁴	2.1×10 ⁻⁸	1.8	0.0037
34	Se	78.96	4.809 ²⁰	221	685	2.03×10 ⁻⁷	0.05	2×10 ⁻⁴
35	Br	79.904	3.11	-7.2	58.8	3.8×10 ⁻⁸	2.4	67.3
36	Kr	83.80	2.418	-157.36	-153.22	1.5×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁴
37	Rb	85.4678	1.53	39.31	688	2.31×10 ⁻⁸	90	0.12
38	Sr	87.62	2.64	777	1382	7.7×10 ⁻⁸	370	7.9
39	Y	88.90585	4.47	1522	3345	1.51×10 ⁻⁸	33	1.3×10 ⁻⁵
40	Zr	91.224	6.52	1855	4409	3.72×10 ⁻⁸	165	3×10 ⁻⁵
41	Nb	92.90638	8.57	2477	4744	2.28×10 ⁻⁸	20	1×10 ⁻⁵
42	Mo	95.94	10.2	2623	4639	8.3×10 ⁻⁹	1.2	0.01
43	Tc	[98]	11	2157	4265			
44	Ru	101.07	12.1	2334	4150	6.1×10 ⁻⁹	0.001	7×10 ⁻⁷
45	Rh	102.90550	12.4	1964	3695	1.12×10 ⁻⁹	0.001	
46	Pd	106.42	12.0	1554.9	2963	4.5×10 ⁻⁹	0.015	

^agraphite¹critical temperature⁶sublimation temperature

الملحق رقم (٣). (تابع).

Z	El	Atomic Weight	Mass density (g/cm ³)	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Elemental Abundances		
						Solar System (%)	Crustal Average (mg/kg)	Earth's Oceans (mg/L)
47	Ag	107.8682	10.501	961.78	2162	1.58×10 ⁻⁹	0.075	4×10 ⁻⁵
48	Cd	112.411	8.69	321.07	767	5.3×10 ⁻⁹	0.15	1.1×10 ⁻⁴
49	In	114.818	7.31	156.60	2072	6.0×10 ⁻¹⁰	0.25	0.02
50	Sn	118.710	7.287 ^{26P}	231.93	2602	1.25×10 ⁻⁹	2.3	4×10 ⁻⁸
51	Sb	121.760	6.685 ^{26P}	630.63	1587	1.01×10 ⁻⁹	0.2	2.4×10 ⁻⁴
52	Te	127.60	6.232	449.51	988	1.57×10 ⁻⁹	0.001	
53	I	126.90447	4.93 ^{20P}	113.7	184.4	2.9×10 ⁻⁹	0.45	0.06
54	Xe	131.29	2.953	-111.75	-108.04	1.5×10 ⁻⁸	3×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
55	Cs	132.90545	1.93	28.44	671	1.21×10 ⁻⁹	3	3×10 ⁻⁴
56	Ba	137.327	3.62	727	1897	1.46×10 ⁻⁸	425	0.013
57	La	138.9055	6.15	918	3464	1.45×10 ⁻⁹	39	3.4×10 ⁻⁵
58	Ce	140.116	8.16	798	3443	3.70×10 ⁻⁹	66.5	1.2×10 ⁻⁶
59	Pr	140.90765	6.77	931	3520	5.44×10 ⁻¹⁰	9.2	6.4×10 ⁻⁷
60	Nd	144.24	7.01	1021	3074	2.70×10 ⁻⁹	41.5	2.8×10 ⁻⁶
61	Pm [145]		7.26	1042	3000			
62	Sm	150.36	7.52	1074	1794	8.42×10 ⁻¹⁰	7.05	4.5×10 ⁻⁷
63	Eu	151.964	5.24	822	1596	3.17×10 ⁻¹⁰	2.0	1.3×10 ⁻⁷
64	Gd	157.25	7.90	1313	3273	1.076×10 ⁻⁹	6.2	7×10 ⁻⁷
65	Tb	158.92534	8.23	1356	3230	1.97×10 ⁻¹⁰	1.2	1.4×10 ⁻⁷
66	Dy	162.50	8.55	1412	2567	1.286×10 ⁻⁹	5.2	9.1×10 ⁻⁷
67	Ho	164.93032	8.20	1474	2700	2.90×10 ⁻¹⁰	1.3	2.2×10 ⁻⁷
68	Er	167.26	9.07	1529	2868	8.18×10 ⁻¹⁰	3.5	8.7×10 ⁻⁷
69	Tm	168.93421	9.32	1545	1950	1.23×10 ⁻¹⁰	0.52	1.7×10 ⁻⁷
70	Yb	173.04	6.90	819	1196	8.08×10 ⁻¹⁰	3.2	8.2×10 ⁻⁷
71	Lu	174.967	9.84	1663	3402	1.197×10 ⁻¹⁰	0.8	1.5×10 ⁻⁷
72	Hf	178.49	13.3	2233	4603	5.02×10 ⁻¹⁰	3.0	7×10 ⁻⁶
73	Ta	180.9479	16.4	3017	5458	6.75×10 ⁻¹¹	2.0	2×10 ⁻⁶
74	W	183.84	19.3	3422	5555	4.34×10 ⁻¹⁰	1.25	1×10 ⁻⁴
75	Re	186.207	20.8	3186	5596	1.69×10 ⁻¹⁰	7×10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁶
76	Os	190.23	22.5	3033	5012	2.20×10 ⁻⁹	0.0015	
77	Ir	192.217	22.5	3446	4426	2.16×10 ⁻⁹	0.001	
78	Pt	195.078	21.46	1768.4	3825	4.4×10 ⁻⁹	0.005	
79	Au	196.96655	19.282	1064.18	2856	6.1×10 ⁻¹⁰	0.004	4×10 ⁻⁶
80	Hg	200.59	13.5336	-38.83	356.73	1.11×10 ⁻⁹	0.085	3×10 ⁻⁵
81	Tl	204.3833	11.8	304	1473	6.0×10 ⁻¹⁰	0.85	1.9×10 ⁻⁵
82	Pb	207.2	11.342	327.46	1749	1.03×10 ⁻⁸	14	3×10 ⁻⁵
83	Bi	208.98038	9.807	271.40	1564	4.7×10 ⁻¹⁰	0.0085	2×10 ⁻⁵
84	Po [209]		9.32	254	962		2×10 ⁻¹⁰	1.5×10 ⁻¹⁴
85	At [210]			302				
86	Rn [222]		4.4	-71	-61.7		4×10 ⁻¹³	6×10 ⁻¹⁰
87	Fy [223]			27				
88	Ra [226]		5	700			9×10 ⁻⁷	8.9×10 ⁻¹¹
89	Ac [227]		10.07	1051	3198		5.5×10 ⁻¹⁰	
90	Th	232.0381	11.72	1750	4788	1.09×10 ⁻¹⁰	69.6	1×10 ⁻⁸
91	Pa	231.03588	15.37	1572			1.4×10 ⁻⁶	5×10 ⁻¹¹
92	U	238.0289	18.95	1135	4131	2.94×10 ⁻¹¹	2.7	0.0032

ملحق (٤). معامل التوهين الكتلي لأشعة جاما.

Mass attenuation coefficient μ/ρ ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$) as a function of photon energy E (MeV)

E (MeV)	μ/ρ ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)							
	Air	Water	Standard tissue (ICRP)	Poly-styrene	Aluminium	Concrete	Iron	Lead
0.010	5.016	5.223	4.783	2.150	25.820	26.190	169.000	179.100
0.015	1.581	1.639	1.523	0.755	7.836	8.185	56.560	62.270
0.020	0.764	0.796	0.750	0.429	3.392	3.605	25.460	27.060
0.030	0.350	0.372	0.358	0.262	1.115	1.202	8.109	8.780
0.040	0.247	0.267	0.260	0.218	0.563	0.607	3.601	3.930
0.050	0.207	0.226	0.222	0.198	0.366	0.392	1.944	2.120
0.060	0.187	0.206	0.203	0.187	0.276	0.294	1.197	1.304
0.080	0.166	0.184	0.182	0.172	0.201	0.212	0.592	0.635
0.10	0.154	0.171	0.169	0.162	0.170	0.178	0.370	0.394
0.15	0.136	0.150	0.149	0.145	0.138	0.143	0.196	0.209
0.20	0.123	0.137	0.136	0.132	0.122	0.127	0.146	0.154
0.30	0.107	0.119	0.118	0.115	0.104	0.108	0.110	0.115
0.40	0.0955	0.106	0.105	0.103	0.0928	0.0963	0.0940	0.098
0.50	0.0871	0.0969	0.0962	0.0938	0.0845	0.0877	0.0841	0.088
0.60	0.0806	0.0896	0.0889	0.0867	0.0780	0.0810	0.0770	0.080
0.80	0.0708	0.0787	0.0781	0.0762	0.0684	0.0710	0.0670	0.070
1.0	0.0636	0.0707	0.0702	0.0685	0.0615	0.0638	0.0599	0.063
1.5	0.0518	0.0576	0.0571	0.0557	0.0501	0.0520	0.0488	0.051
2.0	0.0444	0.0494	0.0490	0.0478	0.0432	0.0448	0.0426	0.044
3.0	0.0358	0.0397	0.0394	0.0382	0.0354	0.0365	0.0362	0.037
4.0	0.0308	0.0340	0.0337	0.0326	0.0311	0.0319	0.0331	0.034
5.0	0.0275	0.0303	0.0300	0.0289	0.0284	0.0290	0.0315	0.033
6.0	0.0252	0.0277	0.0274	0.0263	0.0266	0.0270	0.0306	0.033
8.0	0.0222	0.0243	0.0239	0.0228	0.0244	0.0245	0.0300	0.033
10.0	0.0204	0.0222	0.0218	0.0206	0.0232	0.0231	0.0300	0.033

Values of ρ (in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) are as follows: air, 1.21×10^{-3} ; water, 1.00; standard tissue, 1.00; polystyrene, 1.06; aluminium, 2.7; concrete, 2.30; iron, 7.87; and lead, 11.34.

ملحق (٥). معامل الامتصاص الكتلي لأشعة جاما.

Mass energy absorption coefficient μ_{en}/ρ (cm^2g^{-1}) as a function of photon energy E (MeV)

E (MeV)	μ_{en}/ρ (cm^2g^{-1})							
	Air	Water	Standard tissue (ICRP)	Bone tissue (ICRP)	Poly-styrene	Poly-ethylene	Silicon dioxide	Lithium fluoride
0.010	4.640	4.840	4.403	25.240	1.849	1.717	18.070	5.607
0.015	1.300	1.340	1.231	7.897	0.501	0.466	5.320	1.576
0.020	0.526	0.537	0.496	3.389	0.200	0.187	2.197	0.635
0.030	0.150	0.152	0.142	1.009	0.0606	0.0576	0.627	0.179
0.040	0.0669	0.0680	0.0645	0.425	0.0319	0.0313	0.260	0.0774
0.050	0.0403	0.0416	0.0399	0.221	0.0238	0.0241	0.136	0.0447
0.060	0.0300	0.0315	0.0306	0.133	0.0215	0.0222	0.0831	0.0318
0.080	0.0239	0.0258	0.0254	0.0662	0.0215	0.0226	0.0450	0.0237
0.10	0.0232	0.0254	0.0251	0.0447	0.0229	0.0242	0.0335	0.0222
0.15	0.0249	0.0276	0.0274	0.0318	0.0263	0.0279	0.0277	0.0233
0.20	0.0267	0.0297	0.0294	0.0302	0.0286	0.0303	0.0278	0.0248
0.30	0.0287	0.0319	0.0317	0.0307	0.0309	0.0328	0.0290	0.0266
0.40	0.0295	0.0328	0.0326	0.0311	0.0317	0.0337	0.0296	0.0273
0.50	0.0297	0.0330	0.0328	0.0311	0.0319	0.0339	0.0297	0.0275
0.60	0.0295	0.0328	0.0326	0.0309	0.0318	0.0338	0.0296	0.0274
0.80	0.0288	0.0320	0.0318	0.0301	0.0311	0.0330	0.0288	0.0267
1.0	0.0279	0.0310	0.0308	0.0291	0.0300	0.0319	0.0278	0.0258
1.5	0.0255	0.0283	0.0281	0.0265	0.0274	0.0291	0.0254	0.0236
2.0	0.0234	0.0260	0.0258	0.0245	0.0252	0.0267	0.0234	0.0217
3.0	0.0205	0.0228	0.0226	0.0216	0.0220	0.0232	0.0208	0.0190
4.0	0.0187	0.0206	0.0204	0.0199	0.0198	0.0209	0.0192	0.0173
5.0	0.0174	0.0191	0.0189	0.0188	0.0182	0.0192	0.0181	0.0161
6.0	0.0164	0.0180	0.0178	0.0180	0.0171	0.0179	0.0174	0.0153
8.0	0.0152	0.0166	0.0163	0.0169	0.0155	0.0162	0.0165	0.0141
10.0	0.0145	0.0157	0.0154	0.0164	0.0145	0.0150	0.0160	0.0134

Values of ρ (in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) are as follows: air, 1.21×10^{-4} ; water, 1.00; standard tissue, 1.00; bone tissue, 1.80; polystyrene, 1.06; polyethylene, 0.94; silicon dioxide, 2.32; lithium fluoride, 2.635.

ملحق رقم (٦). المقطع العرضي المجهري $[\sigma(n,p) - \sigma_\alpha(n,\alpha) - \sigma_\gamma(n,\gamma)]$

للنشع σ_s - لانتشار σ_f - الكلي σ_t [لنيوترونات الحرارة]

($E_n = 0.0253 \text{ eV}$) ولبعض العناصر الهامة - (المراجع: *The National Nuclear*)

(Data Center Online Service. ENDF/B-VI)

العنصر	نسبة الوفرة (atom %)	تصف العمر	(b) المقطع المجهري		
^1H	99.985		$\sigma_\gamma = 333 \text{ mb}$	$\sigma_s = 30.5$	$\sigma_t = 30.9$
^2H	0.015		$\sigma_\gamma = 506 \mu\text{b}$	$\sigma_s = 4.26$	$\sigma_t = 4.30$
^3H		12.33 y	$\sigma_\gamma = 6 \mu\text{b}$	$\sigma_s = 1.53$	$\sigma_t = 1.53$
^6Li	92.5		$\sigma_\alpha = 941$	$\sigma_\gamma = 38.6 \text{ mb}$	$\sigma_t = 943$
^7Li	7.42		$\sigma_\gamma = 45.7 \text{ mb}$	$\sigma_s = 1.04$	$\sigma_t = 1.09$
^{10}B	19.6		$\sigma_\alpha = 3840$	$\sigma_\gamma = 0.50$	$\sigma_t = 3847$
^{11}B	80.4		$\sigma_\gamma = 5.33 \text{ mb}$	$\sigma_s = 5.08$	$\sigma_t = 5.08$
^{12}C	98.89		$\sigma_s = 4.74$	$\sigma_\gamma = 3.4 \text{ mb}$	$\sigma_t = 4.74$
^{13}C	1.11		$\sigma_\gamma = 1.37 \text{ mb}$	$\sigma_s = 4.19$	
^{14}C		5736 y	$\sigma_\gamma = 1.0 \mu\text{b}$		
^{14}N	99.64		$\sigma_p = 1.83$	$\sigma_\gamma = 75 \text{ mb}$	$\sigma_t = 12.2$
^{15}N	0.36		$\sigma_\gamma = 24 \mu\text{b}$	$\sigma_s = 4.58$	$\sigma_t = 4.58$
^{16}O	99.756		$\sigma_\gamma = 190 \mu\text{b}$	$\sigma_s = 4.08$	$\sigma_t = 4.03$
^{17}O	0.039		$\sigma_\alpha = 235 \text{ mb}$	$\sigma_\gamma = 3.84 \text{ mb}$	$\sigma_t = 4.17$
^{18}O	0.205		$\sigma_\gamma = 160 \mu\text{b}$		
^{232}Th	100	$1.405 \times 10^{10} \text{ y}$	$\sigma_f = 25 \mu\text{b}$	$\sigma_\gamma = 5.13$	$\sigma_t = 20.4$
^{233}Th		23.3 m	$\sigma_f = 15$	$\sigma_\gamma = 1450$	$\sigma_t = 1478$
^{233}U		$1.592 \times 10^5 \text{ y}$	$\sigma_f = 529$	$\sigma_\gamma = 46.0$	$\sigma_t = 588$
^{234}U	0.0055	$2.455 \times 10^5 \text{ y}$	$\sigma_f = 0.465$	$\sigma_\gamma = 103$	$\sigma_t = 116$
^{235}U	0.7200	$7.038 \times 10^8 \text{ y}$	$\sigma_f = 587$	$\sigma_\gamma = 99.3$	$\sigma_t = 700$
^{238}U		$2.342 \times 10^7 \text{ y}$	$\sigma_f = 47 \text{ mb}$	$\sigma_\gamma = 5.14$	$\sigma_t = 14.1$
^{239}U	99.2745	$4.468 \times 10^8 \text{ y}$	$\sigma_f = 11.8 \mu\text{b}$	$\sigma_\gamma = 2.73$	$\sigma_t = 12.2$
^{239}U		23.45 m	$\sigma_f = 14$	$\sigma_\gamma = 22$	
^{240}Pu		24120 y	$\sigma_f = 749$	$\sigma_\gamma = 271$	$\sigma_t = 1028$
^{240}Pu		6564 y	$\sigma_f = 64 \text{ mb}$	$\sigma_\gamma = 289$	$\sigma_t = 290$
^{241}Pu		14.35 y	$\sigma_f = 1015$	$\sigma_\gamma = 363$	$\sigma_t = 1389$
^{242}Pu		$3.733 \times 10^4 \text{ y}$	$\sigma_f = 1.0 \text{ mb}$	$\sigma_\gamma = 19.3$	$\sigma_t = 27.0$

ملحق رقم (٧). المقطع العرضي المجهري والمجهاري للنيوترونات الحرارية
($En = 0.0253eV$ - ثانية / م 2200)

[المراجع : (3) Reactor Physics Constants, ANL-5800;]

Z	Elements	a.m.u	(g/cm ³)	($\times 10^{-24}$)	$1 - f_0$	ξ	σ_1	σ_1	σ_1	Σ_1	Σ_2	Σ_3
(barn)												
(cm ⁻¹)												
1	H	1.008	8.9 ¹	5.3 ¹	0.1386	1.000	0.33	38	38	1.7 ¹	0.002	0.002
	H ₂ O	18.016	1	0.0335 ¹	0.676	0.948	0.66	103	103	0.022	3.45	3.45
	D ₂ O	20.030	1.10	0.0331 ¹	0.884	0.570	0.001	13.6	13.6	3.3 ¹	0.449	0.449
2	He	4.003	17.8 ¹	2.6 ¹	0.8334	0.425	0.007	0.8	0.807	0.02 ¹	2.1 ¹	2.1 ¹
3	Li	6.940	0.534	0.0463	0.9047	0.268	71	1.4	72.4	3.29	0.065	3.35
4	Be	9.013	1.85	0.1236	0.9259	0.209	0.010	7.0	7.01	124 ¹	0.865	0.865
	BeO	25.02	3.025	0.0720 ¹	0.939	0.173	0.010	6.8	6.8	73 ¹	0.501	0.501
5	B	10.82	2.45	0.1364	0.9394	0.171	755	4	759	103	0.346	104
6	C	12.011	1.60	0.0803	0.9444	0.158	0.004	4.8	4.80	32 ¹	0.385	0.385
7	N	14.008	0.0013	5.3 ¹	0.9524	0.136	1.88	10	11.9	9.9 ¹	50 ¹	60 ¹
8	O	16.000	0.0014	5.3 ¹	0.9583	0.120	20 ¹	4.2	4.2	0.000	21 ¹	21 ¹
9	F	19.00	0.0017	5.3 ¹	0.9649	0.102	0.001	3.9	3.90	0.01 ¹	20 ¹	20 ¹
10	Ne	20.183	0.0009	2.6 ¹	0.9667	0.0988	<2.8	2.4	5.2	7.3 ¹	6.2 ¹	13.5 ¹
11	Na	22.991	0.971	0.0254	0.9710	0.0845	0.525	4	4.53	0.013	0.102	0.115
12	Mg	24.32	1.74	0.0431	0.9722	0.0811	0.069	3.6	3.67	0.003	0.155	0.158
13	Al	26.98	2.699	0.0602	0.9754	0.0773	0.241	1.4	1.64	0.015	0.084	0.099
14	Si	28.09	2.42	0.0522	0.9762	0.0698	0.16	1.7	1.86	0.008	0.089	0.097
15	P	30.975	1.82	0.0354	0.9785	0.0652	0.20	5	5.20	0.007	0.177	0.184
16	S	32.066	2.67	0.0389	0.9792	0.0612	0.22	1.1	1.62	0.020	0.043	0.063
17	Cl	35.457	0.6032	5.3 ¹	0.9810	0.0561	33.8	16	49.8	0.002	80 ¹	0.003
18	A	39.944	0.0018	2.6 ¹	0.9833	0.0492	0.66	1.5	2.16	1.7 ¹	3.9	5.6 ¹
19	K	39.100	0.87	0.0134	0.9829	0.0534	2.07	1.5	3.57	0.028	0.020	0.048

ملحق رقم (٧) - (تابع)

Z	Elements	a.m.u	(g/cm ³) (× 10 ⁻²⁴)	1 - μ_0	ξ	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	Σ_1	Σ_2	Σ_3	Σ_4
20	Ca	40.08	1.55	0.0233	0.9833	0.0492	0.44	3.0	3.44	0.010	0.070	0.090	
21	Sc	44.96	2.5	0.0335	0.9852	0.0438	24	24	48	0.804	0.804	1.61	
22	Ti	47.90	4.5	0.0566	0.9861	0.0411	5.8	4	9.8	0.328	0.226	0.555	
23	V	50.95	5.96	0.0704	0.9869	0.0387	5	5	10.0	0.352	0.352	0.704	
24	Cr	52.01	7.1	0.0822	0.9872	0.0385	3.1	3	6.1	0.255	0.247	0.501	
25	Mn	54.94	7.2	0.0789	0.9878	0.0359	13.2	2.3	15.5	1.04	0.181	1.22	
26	Fe	55.85	7.86	0.0848	0.9881	0.0353	2.62	11	13.6	0.222	0.933	1.15	
27	Co	58.94	8.9	0.0910	0.9887	0.0335	38	7	45	3.46	0.637	4.10	
28	Ni	58.71	8.90	0.0913	0.9887	0.0335	4.6	17.5	22.1	0.420	1.60	2.02	
29	Cu	63.54	8.94	0.0848	0.9886	0.0309	3.85	7.2	11.05	0.0326	0.611	0.937	
30	Zn	65.38	7.14	0.0658	0.9897	0.0304	1.10	3.6	4.70	0.072	0.237	0.309	
31	Ga	69.72	5.91	0.0511	0.9925	0.0283	2.80	4	6.80	0.143	0.204	0.347	
32	Ge	72.60	5.36	0.0445	0.9909	0.0271	2.45	3	5.45	0.109	0.134	0.243	
33	As	74.91	5.73	0.0461	0.9911	0.0264	4.3	6	10.3	0.198	0.277	0.475	
34	Se	78.96	4.8	0.0366	0.9916	0.0251	12.3	11	23.3	0.450	0.403	0.853	
35	Br	79.916	3.12	0.0235	0.9917	0.0247	6.7	6	12.7	0.157	0.141	0.298	
36	Kr	83.80	0.0037	2.6 ¹	0.9921	0.0236	31	7.2	38.2	81 ¹	19 ¹	99 ¹	
37	Rb	85.48	1.53	0.0108	0.9922	0.0233	0.73	12	12.7	0.008	0.130	0.138	
38	Sr	87.63	2.54	0.0175	0.9925	0.0226	1.21	10	11.2	0.021	0.175	0.195	
39	Yt	88.92	5.51	0.0373	0.9923	0.0223	1.313	4.3	4.3	0.049	0.112	0.160	
40	Zr	91.22	6.4	0.0423	0.9927	0.0218	0.185	8	8.2	0.008	0.338	0.347	
41	Nb	92.91	8.4	0.0545	0.9928	0.0214	1.16	5	6.16	0.063	0.273	0.336	
42	Mo	95.95	10.2	0.0640	0.9931	0.0207	2.70	7	9.70	0.173	0.448	0.621	
43	Tc	98.0	—	—	0.9932	0.0203	22	—	—	—	—	—	
44	Ru	101.1	12.2	0.0727	0.9934	0.0197	2.56	6	8.56	0.186	0.436	0.622	
45	Rh	102.91	12.5	0.0732	0.9935	0.0193	149	5	154	10.9	0.366	11.3	

ملحق رقم (٧) - (تابع).

Z	Elements	a.m.u	(g/cm ³) ($\times 10^{-28}$)	1 - ρ_0	ξ	σ_1	σ_2	σ_3	Σ_1	Σ_2	Σ_3	Σ_4
46	Pd	106.4	12.16	0.0689	0.0187	8	3.6	11.6	0.551	0.248	0.799	—
47	Ag	107.88	10.5	0.0586	0.0184	63	6	69	3.69	0.352	4.04	—
48	Cd	112.41	8.65	0.0464	0.0178	2450	7	3457	114	0.325	114	—
49	In	114.82	7.28	0.0382	0.0173	191	2.2	193	7.30	0.084	7.37	—
50	Sn	118.70	6.5	0.0330	0.0167	6525	4	4.6	0.021	0.132	0.152	—
51	Sb	121.76	6.69	0.0331	0.0169	5.7	4.3	10.0	0.189	0.142	0.331	—
52	Te	127.61	6.24	0.0295	0.0155	4.7	5	9.7	0.139	0.148	0.286	—
53	I	126.91	4.93	0.0234	0.0187	7.0	3.6	10.6	0.164	0.084	0.248	—
54	Xe	131.30	0.0039	2.7 [†]	0.0152	35	4.3	39.3	95 [†]	12 [†]	0.801	—
55	Cs	132.91	1.873	0.0085	0.0150	28	20	48	0.238	0.170	0.408	—
56	Ba	137.36	3.5	0.0154	0.0145	1.2	8	9.2	0.018	0.123	0.142	—
57	La	138.92	6.19	0.0268	0.0143	8.9	15	24	0.239	0.402	0.642	—
58	Ce	140.13	6.78	0.0292	0.0142	0.73	9	9.7	0.021	0.263	0.283	—
59	Pr	140.92	6.78	0.0290	0.0141	11.3	4	15.3	0.328	0.116	0.444	—
60	Nd	144.27	6.95	0.0290	0.0138	46	16	62	1.33	0.464	1.79	—
61	Pm	145.0	—	—	0.0137	60	—	—	—	—	—	—
62	Sm	150.35	7.7	0.0309	0.0133	5600	5	5605	173	0.135	173	—
63	Sm ₂ O ₃	348.70	7.43	0.0128 [†]	0.076	16,500	22.6	16,500	211	0.289	211	—
63	Eu	152.0	5.22	0.0207	0.0131	4380	8	4308	89.0	0.166	89.2	—
64	Eu ₂ O ₃	352.30	7.42	0.0127 [†]	0.053	8740	30.2	8770	111	0.383	111	—
64	Gd	167.26	7.95	0.0305	0.0127	46,000	—	—	1403	—	—	—

ملحق رقم (٧) - (تابع)

Z	Elements	a.m.u	(g/cm ³) (× 10 ⁻²⁶)	1 - P ₀	ξ	α _g	α _s	α _l	Σ _a	Σ _s	Σ _t
65	Tb	158.93	8.33	0.0316	0.0125	46	—	—	1.45	—	—
66	Dy	162.51	8.56	0.0317	0.0122	950	100	1050	30.1	3.17	33.3
	Dy ₂ O ₃	372.92	7.81	0.0126	0.019	2200	214	2414	27.7	2.7	30.4
67	Ho	164.94	8.76	0.0320	0.0121	65	—	—	2.08	—	—
68	Er	167.27	9.16	0.0330	0.0119	173	15	188	5.71	0.495	6.20
69	Tm	168.94	9.35	0.0333	0.0118	127	7	134	4.23	0.233	4.46
70	Yb	173.04	7.01	0.0244	0.0115	37	12	49	0.903	0.293	1.20
71	Lu	174.99	9.74	0.0335	0.0114	112	—	—	3.75	—	—
72	Hf	178.5	13.3	0.0449	0.0112	105	8	113	4.71	0.0359	5.07
73	Ta	180.95	16.6	0.0553	0.0110	21	5	26	1.16	0.277	1.44
74	W	183.86	19.3	0.0632	0.0108	19.2	5	24.2	1.21	0.316	1.53
75	Re	186.22	20.53	0.0664	0.0107	86	14	100	5.71	0.930	6.64
76	Os	190.2	22.48	0.0712	0.0105	15.3	11	26.3	1.09	0.783	1.87
77	Ir	192.2	22.42	0.0703	0.0104	440	—	—	30.9	—	—
78	Pt	195.09	21.37	0.0660	0.0102	8.8	10	18.8	0.581	0.660	1.24
79	Au	197.0	19.32	0.0591	0.0101	98.8	9.3	107.3	5.79	0.550	6.34
80	Hg	200.61	13.55	0.0407	0.0099	380	20	400	15.5	0.814	16.3
81	Tl	204.38	11.85	0.0349	0.00967	3.4	14	17.4	0.119	0.489	0.607
82	Pb	207.21	11.35	0.0330	0.0096	0.170	11	11.2	0.006	0.363	0.369
83	Bi	209.0	9.747	0.0281	0.0095	0.034	9	9	0.001	0.233	0.236
84	Po	210.0	9.24	0.0265	0.0095	—	—	—	—	—	—

ملحق رقم (٧) . (تابع).

Z	Elements	a.m.u	(g/cm ³)	($\times 10^{-24}$)	1 - I ₀	ξ	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}
85	At	211.0	—	—	0.9968	0.0084	—	—	—	—	—	—	—	—	—
86	Rn	222.0	0.0097	2.6 ¹	0.9970	0.0090	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—
87	Fr	223.0	—	—	0.9980	0.0089	—	—	—	—	—	—	—	—	—
88	Ra	226.05	5	0.0133	0.9971	0.0088	20	—	—	—	—	—	—	—	—
89	Ac	227.0	—	—	0.9971	0.0088	510	—	—	—	—	—	—	—	—
90	Th	232.05	—	—	0.9971	0.0086	7.56	12.6	—	—	—	—	—	—	—
91	Pa	231.0	15.4	0.0402	0.9971	0.0086	200	—	—	—	—	—	—	—	—
92	U	238.07	18.9	0.04103	0.9972	0.0084	7.68	8.3	—	—	—	—	—	—	—
93	UO ₂	270.07	10	0.0223 ²	0.9887	0.036	7.6	16.7	24.3	—	—	—	—	—	—
94	Np	237.0	—	—	0.9972	0.0084	170	—	—	—	—	—	—	—	—
94	Pu	239.0	19.74	0.0498	0.9972	0.0083	1026	9.6	1036	—	—	—	—	—	—
95	Am	242.0	—	—	0.9973	0.0082	8.000	—	—	—	—	—	—	—	—

*Value has been multiplied by 10⁴.†Molents/cm³.

المراجع

أولاً: المراجع العربية

- [١] آل الشيخ، محمد، وكداشي، أحمد، "مبادئ المفاعلات النووية"، جامعة الملك سعود. الرياض (٢٠٠٧م).
- [٢] آل الشيخ، محمد، وكداشي، أحمد، وعبيد، محمد عبدالفتاح "هندسة الإشعاع النووي"، جامعة الملك سعود. الرياض (٢٠٠٤م).
- [٣] الناغي، أحمد "الفيزياء النووية"، دار الفكر العربي القاهرة (٢٠٠١م).
- [٤] الدغمة، محمد شحادة، وجمعة، على مجمد، "الفيزياء النووية"، مكتبة الفلاح - الكويت (٢٠٠٠م).
- [٥] أحمد، محمد فاروق، والسريع، أحمد محمد "أسس الفيزياء الإشعاعية"، جامعة الملك سعود. الرياض (١٩٩٨م).
- [٦] حسن، فخري إسماعيل "مقدمة في الفيزياء الحديثة"، دار المريخ - الرياض (١٩٩٣م).
- [٧] الأشهب، مطاوع "هندسة الفيزياء النووية"، المركز العربية للتوزيع والترجمة والتأليف والنشر - دمشق (١٩٩١م).

ثانياً: المراجع الأجنبية

- Lewis, E.E. *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics* Academic Press ELSEVIER Inc.USA (2008) [٨]
- Turner, James E. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection* Wilcy-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Third edition, USA (2007) [٩]
- Stabin, Michel G. *Radiation Protection and Dosimetry* , Publisher Springer (2007) [١٠]
- Ian Hore-Lacy, *Nuclear Energy in the 21st Century* ,World Nuclear University Press, USA(2006) [١١]
- Tatjana JeVremmovie, *Nuclear Principles in Engineering* , Publisher Springer (2005) [١٢]
- Shultis J. K. and Faw, R. E. *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering* Marcel Dekker Inc. New York, USA (2002) [١٣]
- Lamarch, J. R. *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, American Nuclear Society, Inc. USA (2002). [١٤]
- Stacey, W. M. *Nuclear Reactor physics* , J. Wiley & Sons, Inc . USA (2001) [١٥]
- Lamarsh, John R. J. Baratta, Anthony *Introduction to Nuclear Engineering* Prentice Hall, Third edition, USA (2001) [١٦]
- Glasston S. and Sesonske, A. *Nuclear Reactor Engineering* (3ed. edition) CBS publishers & Distributors. Delhi – India (1986). [١٧]
- Weisman, J. *Elements of Nuclear Reactor Design* Robert E.Krieger publishing Company. USA (1983) [١٨]
- Ladonchamps J.D. & verdeau, J.J. *Reacteur Nucleaire a Eau Pressurisee* , Masson of cie , Paris France (1978) [١٩]
- Duderstadt J. g. & Hamilton, L. J. *Nuclear Reactor Analysis*, John wiley & sons, New York, USA (1976) [٢٠]

ثالثاً: مواقع مفيدة على شبكة الإنترنت

- <http://www.iaea.org> [٢١]
- <http://www.icrp.org> [٢٢]
- <http://www.icru.org> [٢٣]

http://www.Wikipedia.org	[٢٤]
http://www.word-nuclear.org	[٢٥]
http://www.cameco.com	[٢٦]
http://www.urengo.com	[٢٧]
http://www.anawa.org.au	[٢٨]
http://www.globalsecurity.org	[٢٩]
http://www.japannuclear.com	[٣٠]
http://www.nrc.gov	[٣١]
http://www.euronuclear.org	[٣٢]
http://www.web.ead.anl.gov	[٣٣]
http://www.solocomhouse.com	[٣٤]
http://www.unic.com	[٣٥]
http://www.science.howstaffworks.com.au	[٣٦]
http://www.cea.fr	[٣٧]
http://www.nei.org	[٣٨]
http://www.cogemalahague.com	[٣٩]
http://www.euratom.org	[٤٠]

ثبت المصطلحات

أولاً: عربي- إنجليزي

أ

Measuring Instruments	أجهزة القياس
Probability of decay	احتمال التفكك
Probability of nuclear accidents	احتمال الحوادث النووية
Non leakage probability	احتمال عدم التسرب
Controls devices	أدوات التحكم
Boiling crisis	أزمة الغليان
Excitation	استثارة (تهيج)
Nuclear stability	استقرار نووي
Fuel consumption	استهلاك الوقود
Electron capture	أسر الإلكترون
Nuclear radiation	الإشعاعات النووية
Ionizing radiations	إشعاعات مؤينة

Decay	اضمحلال (تفكك ، انحلال)
Reactor shutdown	إطفاء المفاعل
Neutron absorption	امتصاص النيوترون
Heat production	الإنتاج الحراري
Neutron production	إنتاج النيوترونات
Radioisotopes diffusion	انتشار النظائر المشعة
Nuclear proliferation	الانتشار النووي
Neutron diffusion	انتشار النيوترونات
Two groups neutron diffusion	انتشار زمريتين من النيوترونات
Transport of neutrons	انتقال النيوترونات
Nuclear fusion	اندماج (التحام) نووي
Fission	الانشطار
Fission chain	الانشطار المتسلسل
Fission	انشطار (إنفلاق)

ب

Barn	بارن
Proton	البروتون
Beta particles	بيتا

ت

Resolution	التحليل (الفصل)
Activation analysis	تحليل إشعاعي

Gasçous diffusion enrichment	التخصيب بالانتشار الغازي
Centrifuge enrichment	التخصيب بالطرد المركزي
Becker nozzle enrichment	التخصيب بالفوهات المنحنية
Laser enrichment	التخصيب بالليزر
Waste disposal	التخلص من النفايات
Binding energy	الترابط
Leakage	تسرب
Scattering	تشتت
Irradiation	تشعيع
Type of neutron	تصنيف النيوترونات
Neutron multiplication	تضاعف النيوترونات
Uranium mining	تعدين اليورانيوم
Chain reaction	تفاعل متسلسل
Nuclear reactions	تفاعلات نووية
Disintegration energy	التفكك
Radioactive contamination	تلوث إشعاعي
Slowing down power	التهديئة
Neutron thermalisation	تهديئة النيوترونات
Thermalisation without absorption	التهديئة بدون امتصاص
Attenuation lay	التهوين
Radioactive equilibrium	توازن إشعاعي
Energy distribution	توزيع الطاقة
Gain of critical mass	توفير الكتلة الحرجة
Neutron Current	تيار النيوترونات



Decay constant

ثابت التفكك (الاضمحلال)

Uranium trioxide

ثالث أكسيد اليورانيوم

Enriched (fuel)

ثري (الوقود)



Radiation doses

الجرعات الإشعاعية

Molecules

جزيئات

Alpha particles

جسيمات ألفا



Barrier

حاجز

Critical state

الحالة الحرجة

The prompt criticality

الحالة الحرجة الفورية

Thermal neutron

حراري

Critical mass

الحرجة

Beam

حزمة

Beam intensity

الحزمة

Radiation protection

حماية إشعاعية

Radiological barriers

الحواجز الإشعاعية

Radioactive accidents

حوادث إشعاعية

The flow of coolant accidents	حوادث التحكم في الفاعلية
Nuclear accidents	الحوادث النووية
Potential nuclear accidents	الحوادث النووية المحتملة

ج

Radiation hazard	خطر إشعاعي
Background	خلفية (أرضية)
Background radiation	خلفية إشعاعية

د

Closed control circuit	دائرة التحكم المغلقة
open control circuit	دائرة التحكم المفتوحة
Neutrons cycle	دورة النيوترونات
Nuclear fuel cycle	دورة الوقود النووي
Deuterium (H ₂)	ديتيريوم (نظير للهيدروجين)
Dynamics of nuclear reactors	ديناميكا المفاعلات النووية

ذ

Frequencies	ذبذبات
Atom	ذرة
Peak	ذروة
Atomic mass	الذرية (الكتلة)

ر

Radium

راديوم

ز

One group

الزمرة الواحدة

Two neutron group

الزمرتين من النوترونات

Ion pair

زوج أيوني

س

Rest mass

الساكنة

Fast neutron

سريع

Natural radioactive series

سلاسل النشاط الإشعاعي الطبيعي

Passive safety

السلامة السلبية

Effective safety

السلامة الفعالة

Thorium series

سلسلة الثوريون

ش

Semiconductor detector

شبه موصل

Negative charge

شحنة سالبة

Intensity

شدة

Conditions limit

الشروط الحدودية

ط

Energy

طاقة

Kinetic energy

الطاقة الحركية

Diffusion length

طول الانتشار

Diffusion length

طول مسار الانتشار

Moderation length

طول مسار التهدئة

Migration length

طول مسار هجرة النيوترونات

م

Reflector

عاكس

Effective multiplication factor

عامل التضاعف الفعال

Infinite multiplication factor

عامل التضاعف اللانهائي

Hot channel factor

عامل القناة الساخنة

Mass number

العدد الكتلي

Microscopic cross section

عرض مجهري

Half-life

عمر النصف

Enrichment process

عمليات التخصيب

Element

العنصر

Neutron reflectors

عواكس النيوترونات

Sample

عينة

غ

Control room	غرفة التحكم
Inelastic scattering	غير مرن (التشتت)
Unstable isotopes	غير مستقرة

ف

Reactivity	الفاعلية
Reactivity of xenon	فاعلية الزنون
Reactivity of Samarium	فاعلية السامريوم
Reactivity of toxic elements	فاعلية العناصر السامة
Reactivity of control bars	فاعلية قضبان التحكم
Isotope separation	فصل النظائر
Neutron flux	فيض نيوتروني

ق

Absorption law	قانون الامتصاص
Stopping power	قدرة الإيقاف
Power of the reactor	قدرة التحكم
Control rods	قضبان التحكم
Fuel rods	قضبان الوقود
Reactor core	قلب المفاعل

ك

Detector	كاشف
Mass	الكتلة
Density	كثافة
Spherical reactor	الكروي (مفاعل)
Momentum	كمية الحركة
Curie	كوري

م

Radioactive material	مادة مشعة
Heat exchanger	المبادل الحراري
Cooler	المبرد
Parallelepiped reactor	المتوازي الأضلاع
Mean-life	متوسط العمر (العمر الوسطي)
Laboratory reference	مجاور المختبر
Center mass reference	مجاور مركز الكتلة
Nuclear power plants	محطات القدرة النووية
Fuel enrichment plants	محطات تخصيب الوقود
Fuel fabrication plants	محطات تصنيع الوقود
Fuel reprocessing plants	محطة تكرير الوقود
Orbit	مدار
Square of the diffusion length	مربع المسار الحر للانتشار

Boiling step	مرحلة الغليان
Elastic scattering	مرن (التشتت)
Free paths of neutrons	المسارات الحرة للنيوترونات
Stable isotope	مستقرة (نظائر)
Spent fuel	مستهلك
Charged particles	مشحونة
Radioactive	مشع
Radioactive sources	مصادر مشعة
Source strength	المصدر
Punctual neutron source	مصدر نقطي للنيوترونات
Diffusion equation	معادلة الانتشار
Waste treatment	معالجة النفايات
Resonance escape probability factor	معامل احتمال الهروب
Thermal utilization factor	معامل الاستعمال الحراري
Heat transfer factor	معامل الانتقال الحراري
Thermal diffusion factor	معامل الانشطار الحراري
Fast fission factor	معامل الانشطار السريع
Calibration	معايرة
Mean transport length	معدل المسار الحر الإنتقالي
Scattering angle rate	معدل زاوية التشتت
Chernobyl-Reactor	مفاعل "تشرنوبل"
Three miles island reactor	مفاعل "ثري ميال إزلاند"
Cylindrical reactor	المفاعل الاستوائي
Thermal reactor	مفاعل حراري

Fast breeder reactor	مفاعل سريع ولود
First generation reactors	مفاعلات الجيل الأول
Third generation reactors	مفاعلات الجيل الثالث
Second generation reactors	مفاعلات الجيل الثاني
Fourth generation reactors	مفاعلات الجيل الرابع
Neutron removable Cross-section	المقطع العرضي لإزالة النيوترونات
fission cross-section	المقطع العرضي للانشطار
Macroscopic cross section	مقطع عرض مجهاري
Measure of separation work	مقياس شغل الفصل
Amplifier	مكبر
Mev	مليون إلكترون فولت
Breeder reactor	منتج (مولد للبلوتونيوم)
Moderator	المهدئ
Fissile material	المواد الانشطارية
Neutron absorbing materials	المواد الماصة للنيوترونات
Generator	المولد الكهربائي

ن

Proportion of boiling crisis	نسبة أزمة الغليان
Radioactivity	نشاط إشعاعي
Isotopes	نظائر
Isotopes of plutonium	نظائر البلوتونيوم
Isotopes of uranium	نظائر اليورانيوم

Isotopes of fission fragments	نظائر شظايا الانشطار
Neutron diffusion theory	نظرية انتشار النيوترونات
Neutron transport theory	نظرية انتقال النيوترونات
Fermi diffusion theory	نظرية فرمي للانتشار
Age Fermi theory	نظرية فرمي للعمر
Radioactive waste	نفايات مشعة
Mass defect	نقص الكتلة
Heat transfer	النقل الحراري
Nucleus	نواة
Fission fragments	نواتج الانشطار
Nuclear reactor	نووي (مفاعل)
Nuclear energy	نووية (طاقة)
Nucleon	نوية
Neutron	نيوترون
Neutron detector	النيوترونات
Neutron density	النيوترونات
Prompt neutrons	النيوترونات الفورية
Delayed neutrons	النيوترونات المتأخرة
Neutrino	نيوترينو
Hydrogen	الهيدروجين
Helium	الهيليوم

و

Atomic Weight	وزن ذري
Containment	وعاء حاوي
Reactor Pressure Vessel	وعاء ضغط المفاعل
Mixed Uranium and plutonium oxide fuel	وقود أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم
Nuclear fuel	الوقود النووي
Spent nuclear fuel	الوقود النووي المستهلك
Natural uranium fuel	وقود اليورانيوم الطبيعي
Enriched uranium fuel	وقود اليورانيوم المخصب
Enriched Fuel	وقود مُخصَّب
Daughter nucleus	وليدة

ي

Uranium series	اليورانيوم
Enriched uranium	يورانيوم مُخصَّب (مثري)

ثانياً: إنجليزي - عربي

A

Absorption law	قانون الامتصاص
Activation analysis	تحليل إشعاعي
Age Fermi theory	نظرية فرمي لعمر
Alpha particles	جسيمات ألفا
Amplifier	مكبر
Atom	ذرة
Atomic mass	الذرية
Atomic Weight	وزن ذري
Attenuation lay	التهوين

B

Background	خلفية (أرضية)
Background radiation	خلفية إشعاعية
Barn	بارن
Barrier	حاجز
Beam	حزمة
Beam intensity	الحزمة
Becker nozzle enrichment	التخصيب بالفوهات المنحنية
Beta particles	بيتا

Binding energy	الترابط
Boiling crisis	أزمة الغليان
Boiling step	مرحلة الغليان
Breeder reactor	منتج (مولد للبلوتونيوم)

C

Calibration	معايرة
Center mass reference	محاور مركز الكتلة
Centrifuge enrichment	التخصيب بالطرد المركزي
Chain reaction	تفاعل متسلسل
Charged particles	مشحونة
Chernobyl-Reactor	مفاعل "تشرنوبل"
Closed control circuit	دائرة التحكم المغلقة
Conditions limit	الشروط الحدودية
Containment	وعاء حاوي
Control rods	قضبان التحكم
Control room	غرفة التحكم
Controls devices	أدوات التحكم
Cooler	المبرد
Critical mass	الحرجة
Critical state	الحالة الحرجة
Curie	كوري
Cylindrical reactor	المفاعل الإسطواني

D

Diffusion length	طول مسار الانتشار
Daughter nucleus	وليدة
Decay	اضمحلال (تفكك، انحلال)
Decay constant	ثابت التفكك (الاضمحلال)
Delayed neutrons	النيوترونات المتأخرة
Density	كثافة
Detector	كاشف
Deuterium (H ₂)	ديتيريوم (نظير للهيدروجين)
Diffusion equation	معادلة الانتشار
Dynamics of nuclear reactors	ديناميكا المفاعلات النووية

E

Effective multiplication factor	عامل التضاعف الفعال
Effective multiplication factor	عامل التضاعف الفعال
Effective safety	السلامة الفعالة
Elastic scattering	مرن
Electron capture	أسر الإلكترون
Element	العنصر
Energy	طاقة
Energy distribution	توزيع الطاقة
Enriched Fuel	وقود مُخصَّب

Enriched uranium	يورانيوم مُخصَّب (مثري)
Enriched uranium fuel	وقود اليورانيوم المخصب
Enrichment process	عمليات التخصيب
Escape probability factor	معامل احتمال الهروب
Excitation	استثارة (تهييج)

F

Fast breeder reactor	مفاعل سريع ولود
Fast fission factor	معامل الانشطار السريع
Fast neutron	سريع
Fermi diffusion theory	نظرية فرمي للانتشار
First generation reactors	مفاعلات الجيل الأول
Fissile material	المواد الانشطارية
Fission	الانشطار
Fission chain	الانشطار المتسلسل
fission cross-section	المقطع العرضي للانشطار
Fission fragments	نواتج الانشطار
Fission products	نواتج الانشطار
Fourth generation reactors	مفاعلات الجيل الرابع
Free paths of neutrons	المسارات الحرة للنيوترونات
Frequencies	ذبذبات
Fuel consumption	استهلاك الوقود
Fuel enrichment plants	محطات تخصيب الوقود
Fuel fabrication plants	محطات تصنيع الوقود

Fuel reprocessing plants

محطة تكرير الوقود

Fuel rods

قضبان الوقود

G

Gain of critical mass

توفير الكتلة الحرجة

Gaseous diffusion enrichment

التخصيب بالانتشار الغازي

Generator

المولد الكهربائي

H

Half-life

عمر النصف

Heat exchanger

المبادل الحراري

Heat production

الإنتاج الحراري

Heat transfer

النقل الحراري

Heat transfer factor

معامل الانتقال الحراري

Helium

الهيليوم

Hot channel factor

عامل القناة الساخنة

Hydrogen

الهيدروجين

I

Inelastic scattering

غير مرن

Infinite multiplication factor

عامل التضاعف اللانهائي

Intensity

شدة

Ion pair

زوج أيوني

Ionizing radiations	إشعاعات مؤينة
Irradiation	تشعيع
Isotope separation	فصل النظائر
Isotopes	نظائر
Isotopes of fission fragments	نظائر شظايا الانشطار
Isotopes of plutonium	نظائر البلوتونيوم
Isotopes of uranium	نظائر اليورانيوم

K

Kinetic energy	الطاقة الحركية
----------------	----------------

L

Laboratory reference	مخاور المختبر
Laser enrichment	التخصيب بالليزر
Leakage	تسرب
Lithium	ليثيوم

M

Macroscopic cross section	مقطع عرض مجهاري
Mass	الكتلة
Mass defect	نقص الكتلة
Mass number	العدد الكتلي
Mean transport length	معدل المسار الحر الإنتقالي

Mean-life	متوسط العمر (العمر الوسطي)
Measure of separation work	مقياس شغل الفصل
Measuring Instruments	أجهزة القياس
Mev	مليون إلكترون فولت
Microscopic cross section	عرض مجهري
Migration length	طول مسار هجرة النيوترونات
Mixed Uranium and plutonium oxide fuel	وقود أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم
Moderation length	طول مسار التهدئة
Moderator	مهدئ
Molecules	جزيئات
Momentum	كمية الحركة
N	
Natural radioactive series	سلاسل النشاط الإشعاعي الطبيعي
Natural uranium fuel	وقود اليورانيوم الطبيعي
Negative charge	شحنة سالبة
Neutrino	نيوترينو
Neutron	نيوترون
Neutron absorbing materials	المواد الماصة للنيوترونات
Neutron absorption	امتصاص النيوترون
Neutron Current	تيار النيوترونات
Neutron density	النيوترونات
Neutron detector	النيوترونات
Neutron diffusion	انتشار النيوترونات

Neutron diffusion theory	نظرية انتشار النيوترونات
Neutron flux	فيض نيوتروني
Neutron multiplication	تضاعف النيوترونات
Neutron production	إنتاج النيوترونات
Neutron reflectors	عواكس النيوترونات
Neutron removable Cross-section	المقطع العرضي لإزالة النيوترونات
Neutron thermalisation	تهدئة النيوترونات
Neutron transport theory	نظرية انتقال النيوترونات
Neutrons cycle	دورة النيوترونات
Non leakage probability	احتمال عدم التسرب
Nuclear accidents	الحوادث النووية
Nuclear energy	نووية
Nuclear fuel	الوقود النووي
Nuclear fuel cycle	دورة الوقود النووي
Nuclear fusion	اندماج (التحام) نووي
Nuclear power plants	محطات القدرة النووية
Nuclear proliferation	الانتشار النووي
Nuclear radiation	الإشعاعات النووية
Nuclear reactions	تفاعلات نووية
Nuclear reactor	نووي
Nuclear stability	استقرار نووي
Nucleon	نوية
Nucleus	نواة

O

One group	الزمرة الواحدة
open control circuit	دائرة التحكم المفتوحة
Orbit	مدار

P

Parallelepiped reactor	مفاعل المتوازي الأضلاع
Passive safety	السلامة السلبية
Peak	ذروة
Potential nuclear accidents	الحوادث النووية المحتملة
Power of the control	قدرة التحكم
Probability of decay	احتمال التفكك
Probability of nuclear accidents	احتمال الحوادث النووية
Prompt neutrons	النيوترونات الفورية
Proportion of boiling crisis	نسبة أزمة الغليان
Proton	البروتون
Punctual neutron source	مصدر نقطي للنيوترونات

R

Radiation doses	الجرعات الإشعاعية
Radiation hazard	خطر إشعاعي
Radiation protection	حماية إشعاعية

Radioactive	مشع
Radioactive accidents	حوادث إشعاعية
Radioactive contamination	تلوث إشعاعي
Radioactive equilibrium	توازن إشعاعي
Radioactive material	مادة مشعة
Radioactive sources	مصادر مشعة
Radioactive waste	نفايات مشعة
Radioactivity	نشاط إشعاعي
Radioisotopes diffusion	انتشار النظائر المشعة
Radiological barriers	الحواجز الإشعاعية
Radium	راديوم
Reactivity	الفاعلية
Reactivity of control bars	فاعلية قضبان التحكم
Reactivity of Samarium	فاعلية السامريوم
Reactivity of toxic elements	فاعلية العناصر السامة
Reactivity of xenon	فاعلية الزنون
Reactor core	قلب المفاعل
Reactor Pressure Vessel	وعاء ضغط المفاعل
Reactor shutdown	إطفاء المفاعل
Reflector	عاكس
Resolution	التحليل (الفصل)
Resonance escape probability factor	معامل احتمال الهروب
Rest mass	الساكنة

S

Sample	عينة
Scattering	نشتت
Scattering angle rate	معدل زاوية التشتت
Second generation reactors	مفاعلات الجيل الثاني
Semiconductor detector	شبه موصل
Slowing down power	التهدئة
Source strength	المصدر
Spent fuel	مستهلك
Spent nuclear fuel	الوقود النووي المستهلك
Spherical reactor	الكروي
Square of the diffusion length	مربع المسار الحر للانتشار
Stable isotope	مستقرة
Stopping power	قدرة الإيقاف

T

The flow of coolant accidents	حوادث التحكم في الفاعلية
The prompt criticality	الحالة الحرجة الفورية
Thermal diffusion factor	معامل الانشطار الحراري
Thermal neutron	حراري
Thermal reactor	مفاعل حراري
Thermal utilization factor	معامل الاستعمال الحراري

Thermalisation without absorption	التهدئة بدون امتصاص
Third generation reactors	مفاعلات الجيل الثالث
Thorium series	سلسلة الثوريون
Three miles island reactor	مفاعل "ثري ميال إزلاند"
Transport of neutrons	انتقال النيوترونات
Two groups neutron diffusion	انتشار زمريتين من النيوترونات
Two neutron group	الزمريتين من النوترونات
Type of neutron	تصنيف النيوترونات

U

Unstable isotopes	غير مستقرة
Uranium mining	تعدين اليورانيوم
Uranium series	اليورانيوم
Uranium trioxide	ثالث أكسيد اليورانيوم

W

Waste disposal	التخلص من النفايات
Waste treatment	معالجة النفايات

كشاف الموضوعات

- إطفاء المفاعل ٢١٠، ٣٠٠
- الإنتاج الحراري ٢٩١، ٢٩٧، ٢٩٨، ٢٩٩، ٣٠٠، ٣٠١، ٣٢٧، ٣٢٨
- انتشار الزمر المتعددة من النيوترونات ١٨٣، ١٨٦
- انتشار النظائر المشعة ٣٧٩، ٤٠٤
- الانتشار النووي ٩٧
- انتشار النيوترونات ٩٧، ١١١، ١١٤، ١٤٩، ١٥٣، ١٧١، ١٧٤، ١٧٥
- ١٨٦، ١٨٧، ١٩٤، ١٩٥، ١٩٩
- ٢٠١، ٢٠٤، ٢١٧، ٢٦٢، ٢٦٣
- ٢٦٥، ٢٦٧
- انتشار حرارة الوقود ٢٩١، ٣٠٠
- انتشار زمريين من النيوترونات ١٨٠، ١٨٢
- أجهزة القياس ٦١، ٦٣، ٣٦٩
- احتمال الحوادث النووية ٣٧٧، ٣٧٨
- أدوات التحكم ٦١، ٢٥٧، ٢٥٨
- ٢٧٠، ٢٨٨، ٣٦٩، ٣٧١
- أزمة الغليان ٣١٩، ٣٢٠، ٣٢٢
- ٣٢٣، ٣٢٤، ٣٢٦
- إستراتيجية الدفاع عن عمق ٣٦٩
- استنزاف الوقود ٢٤٦، ٢٤٩، ٢٥٠
- ٢٥٨، ٢٦٠، ٢٧٠، ٢٧٣
- استهلاك الوقود ٢٤٦
- الإشعاعات النووية ٣٣١، ٣٣٢
- ٣٣٣، ٣٣٤، ٣٣٨

أ

خامات اليورانيوم ١ ، ٢ ، ٣ ، ٢٩
خصائص النيوترونات ٩٨

ب

دائرة التحكم المغلقة ٢٨٢ ، ٢٨٣ ، ٢٨٤
دائرة التحكم المفتوحة ٢٧٩ ، ٢٨٠
دفن النفايات ٩٤ ، ٩٥
دورة النيوترونات ١٤٥ ، ١٤٦ ، ١٥٠ ، ١٥١ ، ٢١٧ ، ٢٨٧
دورة الوقود النووي ٢٦ ، ٢٨ ، ٢٩ ، ٦٧ ، ٦٩ ، ٧٤ ، ٧٨ ، ٨٩ ، ٩٥
ديناميكا المفاعلات النووية ١٨٩ ، ٣٧٥

ت

سرعة النيوترونات ٤٣ ، ٩٩ ، ١٠٣ ، ١١١ ، ١٢٢ ، ١٥٧ ، ١٦٨ ، ١٩٣
السلامة السلبية ٤٠٢ ، ٤٠٣

ث

الجرعات الإشعاعية ٦٣ ، ٣٣٢ ، ٣٣٣ ، ٣٣٧ ، ٣٦٤ ، ٣٨٧

ج

الحالة الحرجة الفورية ٢٠٧ ، ٢٠٨
الحماية من أشعة جاما ٣٣١ ، ٣٣٨
الحماية من النيوترونات ٣٣١ ، ٣٥٣ ، ٣٥٨ ، ٣٦٠
الحواجز الإشعاعية ٣٢ ، ٣٤
الحواجز المتعددة ٣٦٨
حوادث التحكم في الفاعلية ٣٧٥
الحوادث النووية المحتملة ٣٦٧ ، ٣٧١ ، ٣٧٣ ، ٣٧٧ ، ٣٨٥ ، ٣٨٦ ، ٣٧٣ ، ٣٦٧ ، ٣٦٨ ، ٣٦٩ ، ٣٧٠ ، ٣٧١ ، ٣٧٣ ، ٣٧٧ ، ٣٧٨ ، ٣٨٥ ، ٣٨٦ ، ٣٨٧ ، ٣٨٨ ، ٣٩٣ ، ٣٩٧ ، ٤٠٤
حوادث امتصاص الحرارة ٣٧٤ ، ٣٧٥ ، ٤٠٢
حوادث تدفق سائل التبريد ٣٧٣

عمليات التخصيب ١ ، ٩	السلامة الفعالة ٤٠٢
عواكس النيوترونات ٣٨ ، ٤٦ ، ٦٤ ،	سلامة المحطة ٦٤ ، ٢١٩ ، ٢٩١ ،
١٢٥ ، ١٢٦ ، ١٤٨ ، ١٥١	٣٢٢ ، ٣٢٦ ، ٣٧٥ ، ٣٧٨
عوامل الفاعلية ٢٢٢ ، ٢٢٦ ، ٢٢٨ ،	
٢٢٩	

ط

غرفة التحكم ٦١ ، ٦٢ ، ٦٤ ، ٣٨٩	طاقة الانشطار ١٢٠ ، ١٢١ ، ٢٩٧
	طرق التكرير ٦٨ ، ٧٦
	طريقة بيراكس ٧١ ، ٩٥
	طول مسار الانتشار ١١٤ ، ١١٦
	طول مسار التهذئة ١١٠ ، ١١١ ، ١١٦

ظ

فاعلية الزنون عند الاتزان ٢٣٤	عامل التضاعف الفعال ١٢٥ ، ١٤٣ ،
فاعلية الزنون ٢٣٤ ، ٢٣٥ ، ٢٣٦ ،	١٤٥ ، ١٤٦ ، ١٤٧ ، ١٥٠ ، ١٨٩ ،
٢٣٧ ، ٢٣٨ ، ٢٣٩	١٩٠ ، ١٩٩ ، ٢٠٥ ، ٢٠٧ ، ٢١٩ ،
فاعلية العناصر السامة ٢٣١ ، ٢٣٢ ،	٢٢١ ، ٢٢٦ ، ٢٢٩ ، ٢٣٠ ، ٢٣١ ،
فاعلية المواد الماصة ٢٥٧ ، ٢٥٨ ،	٢٥٧ ، ٢٧٠
٢٧٠ ، ٢٧١	عامل التضاعف اللانهائي ١٢٥ ،
فاعلية قضبان التحكم ٢٥٧ ، ٢٥٨ ،	١٢٦ ، ١٢٧ ، ١٣٤ ، ١٣٥ ، ١٤١ ،
٢٦٠ ، ٢٦٦ ، ٢٦٨ ، ٢٦٩	١٤٣ ، ١٤٥ ، ١٥٠ ، ١٥١ ، ١٩٥ ،
الفاعلية ١٩٩ ، ٢٠٢ ، ٢٠٣ ، ٢٠٤ ،	عامل القناة الساخنة ٣٢٣ ، ٣٢٤ ،
٢٠٥ ، ٢٠٦ ، ٢٠٧ ، ٢٠٨ ، ٢٠٩ ،	٣٢٥ ، ٣٢٦ ، ٣٢٧
٢١٠ ، ٢١١ ، ٢١٢ ، ٢١٣ ، ٢١٤ ،	علاقة الفاعلية بمدة دورة المفاعل ٢٠٤
٢١٥ ، ٢١٦ ، ٢١٧ ، ٢١٩ ، ٢٢٠ ،	
٢٢١ ، ٢٢٢ ، ٢٢٥ ، ٢٢٦ ، ٢٢٧ ،	

القفزة الفورية للفاعلية ٢٠٨ ، ٢١٠	٢٢٨ ، ٢٢٩ ، ٢٣٠ ، ٢٣١ ، ٢٣٦
قلب المفاعل ٣٢ ، ٣٣ ، ٣٤ ، ٣٥	٢٣٧ ، ٢٤٢ ، ٢٤٥ ، ٢٥١ ، ٢٥٢
٣٨ ، ٣٩ ، ٤٠ ، ٤٣ ، ٤٤ ، ٤٥	٢٥٣ ، ٢٥٥ ، ٢٥٦ ، ٢٥٨
٤٦ ، ٤٧ ، ٥٠ ، ٥١ ، ٥٢ ، ٥٣	٢٦٠ ، ٢٦٢ ، ٢٦٣ ، ٢٦٤ ، ٢٧٠
٥٥ ، ٥٧ ، ٦١ ، ٦٢ ، ٦٣ ، ٦٤	٢٧٢ ، ٢٧٣ ، ٢٧٤ ، ٢٧٥ ، ٢٧٧
٦٩ ، ٧٧ ، ٧٨ ، ٧٩ ، ١٢١	٢٧٩ ، ٢٨٠ ، ٢٨١ ، ٢٨٢ ، ٢٨٤
١٢٦ ، ١٣٥ ، ١٣٦ ، ١٣٨ ، ١٤٠	٢٨٥ ، ٢٨٦ ، ٢٨٧ ، ٢٨٨ ، ٢٨٩
١٤١ ، ١٤٨ ، ١٤٩ ، ١٥٠ ، ١٥١	٢٩٠ ، ٣٧٥ ، ٣٧٦ ، ٣٧٨
١٥٣ ، ١٥٤ ، ١٧٨ ، ١٨١ ، ١٨٢ ، ١٩٠	فصل النظائر ٨٥ ، ٨٩ ، ٣٦٣
١٩٩ ، ٢٠٦ ، ٢٠٨ ، ٢١٠ ، ٢١٣	
٢١٦ ، ٢٢٠ ، ٢٢٧ ، ٢٢٨ ، ٢٢٩	
٢٣١ ، ٢٣٢ ، ٢٣٣ ، ٢٣٨ ، ٢٤٠	
٢٤٥ ، ٢٤٦ ، ٢٤٩ ، ٢٥٠ ، ٢٥١	
٢٥٥ ، ٢٥٧ ، ٢٥٨ ، ٢٦٠ ، ٢٦١	
٢٦٤ ، ٢٦٥ ، ٢٧٠ ، ٢٨٢ ، ٢٨٩	
٢٩٢ ، ٢٩٧ ، ٢٩٨ ، ٢٩٩ ، ٣٠٠	
٣١٣ ، ٣١٥ ، ٣٢٢ ، ٣٢٣ ، ٣٢٤	
٣٢٩ ، ٣٢٦ ، ٣٢٣ ، ٣٢٦ ، ٣٢٩	
٣٧٣ ، ٣٧٤ ، ٣٧٥ ، ٣٧٦ ، ٣٧٨	
٣٨٩ ، ٣٩١ ، ٣٩٢ ، ٣٩٣ ، ٣٩٨	
٤٠٣ ، ٤٠٦	

ق

قدرة التحكم ٢٧٠ ، ٢٨٨

قضايا التحكم ٣٣ ، ٤٨ ، ٥٠ ، ٥١	
٥٣ ، ٦١ ، ٦٢ ، ١٩٠ ، ٢١٠	
٢١٢ ، ٢١٨ ، ٢٤٩ ، ٢٥١ ، ٢٥٢	
٢٥٦ ، ٢٥٨ ، ٢٥٩ ، ٢٦٠ ، ٢٦٣	
٢٦٥ ، ٢٦٦ ، ٢٦٨ ، ٢٦٩ ، ٢٧٠	
٢٧٣ ، ٢٨٠ ، ٢٨٢ ، ٢٨٤ ، ٢٨٨	
٢٨٩ ، ٢٩٠ ، ٢٩٣ ، ٢٩٥ ، ٢٩٨	
٣٩٢ ، ٣٩٣	

قضايا الوقود ٣٣ ، ٣٨ ، ١٣٥ ، ٢٩٧	
٢٩٨ ، ٢٩٩ ، ٣٠١ ، ٣٠٢ ، ٣٠٦	
٣٠٩ ، ٣١٠ ، ٣٢٣ ، ٣٢٥ ، ٣٢٦	
٣٢٧ ، ٣٢٩ ، ٣٩١ ، ٣٩٣ ، ٣٩٦	

الكميات العديدة ١٥٤ ، ١٥٩



- المسارات الحرة للنيوترونات ١١٢
مصدر مشع ٣٣٨، ٣٣٩، ٣٤٦، ٣٤٨،
٣٤٩، ٣٥٠، ٣٥١، ٣٥٢، ٣٦٥
مصدر نقطي ١٦٤، ١٦٥، ١٨٧،
٣٣٨، ٣٤٤، ٣٦٥
معادلات التحكم ٢٥٧، ٢٧٣، ٢٧٥
معالجة النفايات ٦٧، ٧٣، ٨١، ٨٣،
٨٤، ٨٩، ٩٠، ٩١، ٩٦
معامل احتمال الهروب من الامتصاص
١٢٧، ١٢٩، ١٣١، ١٣٢، ١٣٨،
١٣٩، ١٥٠، ١٥١، ٢٢١، ٢٢٣،
٢٢٥، ٢٢٦
معامل الاستعمال الحراري ١٢٧،
١٣٣، ١٤٠، ١٤١، ١٥٠، ١٥١،
١٩٤، ١٩٥، ٢٢١، ٢٢٥، ٢٢٧،
٢٣٠، ٢٣١، ٢٥٥، ٢٨٨
معامل الانتقال الحراري ٢٩٤، ٣١٠،
٣١١، ٣١٣، ٣٢٩
معامل الانشطار الحراري ١٢٧، ١٢٨،
١٣٦، ١٤١، ١٥٠، ١٥١، ٢٢١،
٢٥٢
معامل الانشطار السريع ١٢٧، ١٢٩،
١٣٧، ١٥٠، ٢٢١
معدل الطاقة المفقودة ١٠٨، ١٢٣
- الكميات المنتجة ١٥٦، ١٥٧، ١٦٠
المبادل الحراري ٣٢، ٣٤، ٣٧، ٤٢،
٥٣، ٥٥، ٣٨٩، ٣٩٠
المبرد ٢٠، ٣٣، ٣٨، ٤٠، ٤٧، ٤٩،
٦٠، ٢٢٢، ٢٢٦، ٢٢٨، ٢٢٩،
٢٤٩، ٢٥١، ٢٥٨، ٢٦٠، ٢٨٨،
٢٩١، ٢٩٨، ٢٩٩، ٣١٠، ٣١٥،
٣١٦، ٣١٧، ٣١٨، ٣٢٠، ٣٢١،
٣٢٢، ٣٢٣، ٣٢٩، ٣٩١
محطات القدرة النووية ٣١، ٣٢، ٣٦،
٣٧، ٤٨، ٥٦، ٥٧، ٦٤، ٨٥،
٨٨، ٣٦١، ٣٦٢، ٣٦٩، ٣٧٠،
٣٧٢، ٣٧٣، ٣٨٦، ٤٠٥
محطات تخصيب الوقود ٣٦١
محطات تصنيع الوقود ١، ٢٠، ٣٦٣،
٣٧٠
محطات معالجة الوقود ٣٦٣
محطة تصنيع الوقود ٣٨٧
محطة تكرير الوقود ٣٧٣، ٣٨٨
مرحلة الغليان ٢٩١، ٣١١، ٣١٧،
٣٢٠، ٣٢١، ٣٢٢

المقطع العرضي لإزالة النيوترونات	معدل زاوية التشتت ١٠٩، ١١٣
٣٥٧، ٣٥٥، ٣٥٤	مفاعلات الجيل الأول ٤٧، ٤٨، ٢٥٨
المقطع العرضي للانشطار ١١٧	مفاعلات الجيل الثالث ٢٠، ٥٦، ٥٧،
مقياس شغل الفصل ٧، ٨، ٣٠	٤٠٣
مناجم اليورانيوم ٢، ٣، ٢٩، ٨٢،	مفاعلات الجيل الثاني ٤٨، ٥٦، ٥٧
٨٩، ٨٤	مفاعلات الجيل الرابع ٥٩
المهدئ ٣٨، ٤٣، ٤٧، ٦٤، ١٠٧،	المفاعلات النووية ٥، ٢٠، ٢٦، ٣١،
١١٦، ١٢٣، ١٢٩، ١٣١، ١٣٥،	٣٢، ٣٣، ٣٥، ٣٨، ٣٩، ٤٠،
١٣٧، ١٣٨، ١٤٠، ١٤٢، ١٤٨،	٤١، ٤٢، ٤٣، ٤٤، ٤٥، ٤٦،
١٩٤، ١٩٥، ٢٢٢، ٢٢٣، ٢٢٦،	٤٧، ٤٨، ٤٩، ٥١، ٦١، ٦٥، ٦٨،
٢٢٧، ٢٢٨، ٢٢٩، ٢٨٩، ٢٩٧،	٧٤، ٧٨، ٨٣، ٩٧، ١٠٠،
٢٩٨، ٢٩٩	١٠٦، ١١٧، ١٢٠، ١٢٥، ١٢٧،
المواد الانشطارية ٣٨، ٣٩، ٤٠، ٥٥،	١٤٨، ١٥٠، ١٥٣، ١٧٥، ١٧٦،
٥٩، ٦٤، ٦٧، ٦٨، ٩٧، ١١٧،	٢٥٨، ٢٧٥، ٢٩٧، ٣٠٢، ٣١٧،
١١٨، ١٢٢، ٢٤٥، ٢٤٧، ٢٥٤،	٣٢٢، ٣٢٧، ٣٣٤، ٣٧٣، ٣٧٤،
٢٥٧، ٣٦٩، ٣٧٠، ٣٧٢	٣٧٥، ٣٩١، ٣٩٦
المواد الماصة للنيوترونات ٥٤، ٢٠٧،	المقطع العرضي المجهاري ١٠٥، ١٠٦،
٢٥٢، ٢٥٩، ٢٧٠	١٠٩، ١١٢، ١٢٢، ١٥٦، ١٦١،
المولد الكهربائي ٣٢، ٣٧	١٦٨، ١٦٩، ١٧٤، ٢٠٠، ٢٠١،
	٢٢٣، ٢٢٦، ٢٢٧، ٢٣١، ٢٤٧،
	٢٥٢، ٢٥٣، ٢٦٣، ٢٧١، ٢٩٨،
	المقطع العرضي المجهري ١٠٣، ١٠٤،
نسبة أزمة الغليان ٣٢٣، ٣٢٤، ٣٢٦	١٠٥، ١٠٦، ١١٧، ١١٨، ١١٩،
نظائر البلوتونيوم ٧٨، ٧٩، ٨٩	١٢٢، ٢٣٢، ٢٣٤

نظائر اليورانيوم ٥ ، ١١ ، ٧٨

نظائر شظايا الانشطار ٢٤٨

نظرية انتقال النيوترونات ١٥٣ ، ١٥٤ ،

١٦٠ ، ١٦٢ ، ١٦٣ ، ١٧٠ ، ١٧١ ،

١٨٦ ، ١٨٧ ، ٢٦٢

نفايات التكرير ٥

النفايات المشعة ٦٧ ، ٦٨ ، ٧٧ ، ٨٠ ،

٨٢ ، ٨٣ ، ٨٤ ، ٨٥ ، ٨٦ ، ٨٨ ،

٨٩ ، ٩٢ ، ٩٤ ، ٩٥ ، ٩٦

النقل الحراري ٢٩١ ، ٢٩٢ ، ٢٩٤ ،

٢٩٦ ، ٣١٢ ، ٣١٨ ، ٣١٩ ، ٣٢٧

نواتج الانشطار ٦٠ ، ١١٩

النيوترونات الفورية ١٩٠ ، ١٩١ ،

١٩٢ ، ١٩٣ ، ١٩٥ ، ١٩٦ ، ١٩٧ ،

١٩٨ ، ٢٠٤ ، ٢١١ ، ٢١٧ ، ٣٧٦

النيوترونات المتأخرة ١٢٠ ، ١٩١ ،

١٩٢ ، ١٩٥ ، ١٩٦ ، ١٩٧ ، ١٩٨ ،

١٩٩ ، ٢٠٠ ، ٢٠١ ، ٢٠٤ ، ٢٠٦ ،

٢٠٧ ، ٢٠٨ ، ٢٠٩ ، ٢١٠ ، ٢١٢ ،

٢١٣ ، ٢١٧ ، ٢٧٤ ، ٢٧٦ ، ٢٧٨ ،

٢٨٩ ، ٢٩٠ ، ٣٧٦

الوعاء ٣٢ ، ٣٤ ، ٥١ ، ٧٣ ، ٣٦٣ ،

٣٧٤

الوقاية من الإشعاعات النووية ٣٣٢

الوقود النووي المستهلك ١ ، ٦٧ ، ٦٨ ،

٦٩ ، ٧٠ ، ٧١ ، ٧٥ ، ٧٦ ، ٧٧ ،

٧٨ ، ٨٠ ، ٨٣ ، ٨٨ ، ٨٩ ، ٩٥

الوقود النووي ١ ، ٢ ، ١٩ ، ٢٠ ، ٢٦ ،

٢٧ ، ٢٨ ، ٢٩ ، ٣٠ ، ٣٨ ، ٣٩ ،

٤٠ ، ٤٧ ، ٥٨ ، ٥٩ ، ٦٥ ، ٦٧ ،

٦٨ ، ٦٩ ، ٧٠ ، ٧١ ، ٧٢ ، ٧٤ ،

٧٥ ، ٧٦ ، ٧٧ ، ٧٨ ، ٧٩ ، ٨٠ ،

٨٣ ، ٨٨ ، ٨٩ ، ٩٥ ، ١٦٤ ،

٢٩١ ، ٣٠٢ ، ٣٠٥ ، ٣٢٨

وقود اليورانيوم الطبيعي ٢٠ ، ٢١ ،

٢٣ ، ٢٤ ، ٢٥ ، ٤٥ ، ٤٧ ، ٤٨ ،

٥٨ ، ١٤٢

وقود اليورانيوم المخضب ٢٠ ، ٢٣ ،

٢٥ ، ٤٧ ، ٥٠ ، ١٤٢