الهيئة العربية للطاقة الذرية

المفاعلات البحثية
أنواعها واستخداماتها

تأليف

أ. د. إبراهيم داخلي عبد الرازق

أستاذ فخري

هيئة الطاقة الذرية المصرية

ترجمة

م. نهلة عبد الحميد نصر

الهيئة العربية للطاقة الذرية

إشراف ومراجعة

أ. د. محمود نصر الدين

الهيئة العربية للطاقة الذرية

تونس 2008

الذرة في خدمة الإنسان


بسم الله الرحمن الرحيم

المفاعلات البحثية
أنواعها واستخداماتها

تأليف

أ. د. إبراهيم داخلي عبد الرازق

أستاذ فخري

هيئة الطاقة الذرية المصرية

ترجمة

م. نهلة عبد الحميد نصر

الهيئة العربية للطاقة الذرية

إشراف ومراجعة

أ. د. محمود نصر الدين

الهيئة العربية للطاقة الذرية

تونس 2008

بسم الله الرحمن الرحيم

في السنوات القليلة الأخيرة، أبدت الدول العربية اهتماماً متزايداً بالتطبيقات السلمية للطاقة الذرية وبشكل خاص باستخدام الطاقة النووية في توليد الكهرباء وإزالة ملوحة مياه البحر. وقد أصدر مجلس الجامعة على مستوى القمة (الرياض 2007) قرارين يدعوان إلى تنمية الإستخدامات السلمية للطاقة الذرية في الدول العربية وإلى وضع برنامج عربي مشترك في هذا المجال، كما كرر المجلس نفسه هذين القرارين في اجتماعه بدمشق 2008 من أجل دعم التنمية الإقتصادية والإجتماعية المستدامة الشاملة .

إن الخطوة الأولى نحو بناء محطة توليد كهرباء بالطاقة النووية تكمن في بناء وتشغيل مفاعل بحثي. وهذا ما سيسمح للدولة بتنمية مواردها البشرية الضرورية لتشغيل وصيانة المفاعلات، للتعامل مع الوقود النووي والمخلّفات النووية وفي رفع مستوى العاملين في ميدان الأمان والأمن النوويين. كما أن ذلك سيساهم ببناء القدرات الوطنية في ميادين أخرى ذات صلة كالإلكترونيات والميكانيك وعلوم البيئة وغيرها .

إن الهيئة العربية للطاقة الذرية، وبحكم مهامها، تعمل على تنمية استخدامات الطاقة النووية للأغراض السلمية وعلى دعم كل الجهود التي تهدف إلى بناء مشاريع اقتصادية تستخدم الطاقة والتقنيات النووية. ويقع موضوع تنمية الموارد البشرية في رأس أولويات عملها. ويعتبر النشر العلمي باللغة العربية أمراً ضرورياً لتوسيع قاعدة القراء ولإغناء المكتبة العربية بالكتب والوثائق ذات الصلة.

يقدم هذا الكتاب مجموعة من مفاعلات البحوث العاملة في مختلف دول العالم بالإضافة إلى مختلف تطبيقاتها في الجامعات وفي مراكز البحوث أو لإنتاج النظائر المشعة. نرجو أن يساهم هذا الكتاب في دعم جهود الهيئة العربية للطاقة الذرية وبقية هيئات الطاقة الذرية في الدول العربية في عملية بنائها للموارد البشرية وفي خلق ثقافة المفاعلات النووية لدى العلميين العرب .

أشكر الأستاذ الدكتور إبراهيم داخلي على الجهود التي بذلها في إعداد هذا الكتاب بنسخته الإنجليزية. كما أشكر المهندسة نهلة نصر على عملها الجاد في نقله إلى اللغة العربية. ويحدوني أمل في أن يكون لهذا الكتاب الموقع الجيد في المكتبات العربية المتخصصة نظراً لأهميته في تقديم مفاعلات البحوث إلى المهتمين بالطاقة النووية في الدول العربية على ضوء الإهتمام العربي المتزايد بها وبمختلف تطبيقاتها السلمية .

والله ولي التوفيق

المدير العام

أ. د. محمود نصر الدين

مقدمة

المفاعل النووي، بلغة عامة، هو جهاز تبدأ داخله التفاعلات النووية المتسلسلة وتتم السيطرة عليها وإدامتها عند معدل ثابت. وعندما يتم صدم نوى الذرات الثقيلة للوقود (غالباً اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم-239) بنترون بطيء، فإنها قد تنشطر إلى إثنتين أو أكثر من النوى الأصغر كنواتج انشطار، مطلقة طاقة ونترونات في عملية تسمى الإنشطار النووي. تلك النترونات السريعة الوليدة تخضع بعد ذلك لتصادمات متعاقبة عديدة مع وجود مادة كتلتها الذرية قليلة نسبياً، وهي المهدئ، لتصبح نترونات مبطّأة إلى السرعة الحرارية. ومن المهدئات النموذجية المستعملة : الماء العادي، الماء الثقيل، الغرافيت والبريليوم. ثم تقدح تلك النترونات إنشطارات أخرى، وهكذا. وعندما تتم السيطرة على هذا التفاعل النووي المتسلسل، فإنه يمكن استخدام الطاقة المنطلقة لتسخين المياه، وإنتاج البخار الذي يدفع توربينة لتوليد الكهرباء. إن عملية الإنشطار، والطاقة المنطلقة منها، تتم السيطرة عليها عن طريق إدخال قضبان التحكم عبر المفاعل. تلك القضبان هي ماصات قوية للنترونات، وهكذا فإن النترونات التي تكفي فقط لإدامة التفاعل المتسلسل هي التي تبقى في قلب المفاعل. ويجب إزالة الطاقة المنطلقة باستمرار، غالباً في صورة حرارة، لحماية قلب المفاعل من الضرر .

إن الإستخدام الأكثر أهمية للمفاعلات النووية هو كمصدر للطاقة لتوليد القدرة الكهربائية ولإدارة بعض السفن الحربية. ويتم هذا عادة بطرق تتضمن استخدام الحرارة الناتجة من التفاعل النووي لإدارة توربينات البخار. وتستخدم المفاعلات البحثية لإنتاج النظائر المشعة وفي تجارب حزم النترونات الحرة. وتاريخياً، كان الإستخدام الأول للمفاعلات النووية هو لإنتاج البلوتونيوم بدرجة الأسلحة من أجل الأسلحة النووية .

حالياً، جميع المفاعلات النووية التجارية مبنية على أساس الانشطار النووي. أما قدرة الإندماج فهي تقانة تجريبية مبنية على الإندماج النووي بدلاً من الإنشطار .

جدول المحتويات

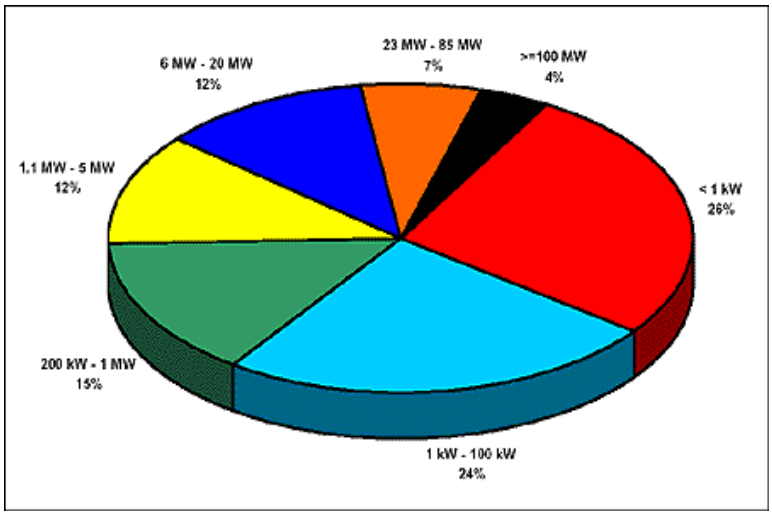
1 ـ تقديم 8
2 ـ تصنيف المفاعلات البحثية 10
3 ـ أنواع المفاعلات البحثية 12
1.3 ـ مفاعل ARGONAUT 12
2.3 ـ مفاعل SLOWPOKE 13
3.3 ـ مفاعل MNSR 14
4.3 ـ مفاعلات TRIGA 16
5.3 ـ مفاعلات اختبار المواد (MTR) 17
6.3 ـ مفاعل MAPLE 18
7.3 ـ مفاعلات التدفق العالي 19
1.7.3 ـ مفاعل التدفق العالي (HFR) في Patten بهولندا 20
2.7.3 ـ مفاعل النظائر ذو التدفق العالي (HFIR) في ORNL 20
8.3 ـ مفاعلات إنتاج النظائر المشعة 22
4 ـ وقود المفاعلات البحثية 23
5 ـ الوقود المستهلك من المفاعلات البحثية 25
6 ـ إستخدام المفاعلات البحثية 26
1.6 ـ دراسات بنية المادة 27
1.1.6 ـ دراسات ضرر الإشعاع 27
2.1.6 ـ الإختبارات اللاّإتلافية بالنترونات 27
2.6 ـ التحليل بالتنشيط النتروني 28
3.6 ـ إستخدام المفاعلات في الطب 29
4.6 ـ إستخدام المفاعلات في التطبيقات الصناعية 31
1.4.6 ـ التصوير بالأشعة النترونية 31
2.4.6 ـ منشآت التطعيم التحولي للسليكون بالنترونات 32

5.6 ـ إستخدام المفاعلات في البحوث الأكاديمية 33
1.5.6 ـ التدريس 34
2.5.6 ـ البحث 35
1.2.5.6 ـ التحليل بالتنشيط 35
2.2.5.6 ـ الإختبارات اللاّإتلافية بالنترونات 36
3.2.5.6 ـ إنتاج النظائر المشعة 36
3.5.6 ـ ملاحظات على أنواع المفاعلات بالجامعات 36
6.6 ـ إستخدام المفاعلات لأغراض التدريب 36
1.6.6 ـ السمات المطلوبة في المفاعلات لأغراض التدريب 37
2.6.6 ـ البرامج التدريبية 37
3.6.6 ـ المحاكيات 38
4.6.6 ـ التدريس بمساعدة الحاسوب 38
7 ـ ملاحظات ختامية 38
8 ـ المراجع 39
ملحق أ : مفاعلات TRIGA 40
ملحق ب : السمات الأساسية لمفاعل ETRR-2 52
ملحق ج : السمات الأساسية لمفاعل HANARO 56
ملحق د 1 : مفاعل التدفق العالي (HFR) في Patten 60
ملحق د 2 : مفاعل النظائر ذو التدفق العالي (HFIR) في ORNL 62
ملحق هـ : مفاعل OPAL 68
ملحق و : التطعيم التحولي للسليكون 73
ملحق ز : الدورات التدريبية بالمفاعلات البحثية 84
ملحق ح : البرامج التدريبية ذات الصلة بالمفاعلات البحثية 86

1 ـ تقديم

تشكّل المفاعلات البحثية نطاقاً واسعاً من المفاعلات النووية المدنية والتجارية التي لا تستخدم عموماً لتوليد القدرة. إن الغرض الأساسي من المفاعلات البحثية هو تزويد مصدر نتروني للبحوث وأغراض أخرى. ويمكن أن يكون لنتاجها (أحزمة النترونات) خصائص مختلفة تعتمد على استخدامها. وهي مفاعلات صغيرة بالنسبة لمفاعلات القوى التي تكمن وظيفتها الأساسية في إنتاج الحرارة لتوليد الكهرباء. ويعبر عن قدرتها بالميغاواط (أو الكيلوواط) الحرارية (MWt أو KWt)، لكننا سوف نستعمل هنا ببساطة MW (أو KW) .

إن قاعدة بيانات المفاعلات البحثية النووية للوكالة الدولية للطاقة الذرية (RRDB) [1] تتضمن معلومات عن 278 (+6 غير مؤكدة تماماً) مفاعلاً بحثياً عاملاً، تتراوح في قدرتها ما بين صفر إلى عدة مئات من الميغاواط الحرارية. من تلك المفاعلات الـ 278 البحثية العاملة، هناك 200 مفاعل بمستوى قدرة أقل من 5 ميغاواط، والـ 78 مفاعلاً الباقية تتراوح قدرتها من 5 ميغاواط إلى عدة مئات من الميغاواط. ويبين الشكل رقم (1) توزيع تلك المفاعلات في العالم .



شكل رقم (1)
توزيع قدرات مفاعلات البحوث في العالم

تعد المفاعلات البحثية أبسط كثيراً من مفاعلات القوى ويتم تشغيلها عند درجات حرارة أقل. كما أنها تحتاج إلى وقود أقل بكثير وتنتج نواتج إنشطار أقل عند استخدام الوقود. وهي مصممة بشكل رئيسي من أجل توليد شدة نترونية عالية للأغراض البحثية. كما يمكن استعمالها من أجل التدريب واختبار المواد وتوليد النويدات المشعة .

ومن ناحية أخرى، فإن وقودها يحتاج إلى يورانيوم مخصب بصورة أكبر، نموذجياً حتى 20% يورانيوم-235، بالرغم من أن البعض الأقدم منها يستخدم يورانيوم مخصب بنسبة 93% يورانيوم-235. كما أن لديها كثافة قدرة عالية في قلب المفاعل، والتي تستلزم ملامح خاصة في التصميم. وكما في مفاعلات القوى، يحتاج قلب المفاعل إلى التبريد، وعادة لابد من استخدام مهدئ لإبطاء النترونات وتعزيز الإنشطار. ولأن مهمتها الأساسية هي إنتاج النترونات، فإن معظم المفاعلات البحثية تحتاج أيضاً إلى عاكس لتقليل فقدان النترونات من قلب المفاعل. ولمدة 60 عاماً تقريباً ظلّت المفاعلات البحثية مراكز للإبتكار والإنتاجية من أجل العلوم والتقانات النووية. إن البحث متعدد الأنظمة الذي تدعمه المفاعلات البحثية قد أحدث تطورات جديدة في القدرة النووية، إنتاج النظائر المشعة، بحوث حزم النترونات، الطب النووي، تطوير المواد، إختبار المركّبات، صلاحية كود الحاسوب والتحكم في التلوث .

في يونيو/حزيران 2004، تضمنـت قاعدة بيانات المفاعلات البحثية للوكالة الدولية للطاقة الذريـة معلومـات حول 672 مفاعلاً بحثياً، منها 274 مفاعـلاً عامـلاً في 56 دولـة (85 مفاعـلاً في 39 دولة نامية)، 214 مفاعلاً تم إيقافها، 168 مفاعـلاً تم تفكيكها و16 مفاعلاً مخطط لها أو تحت الإنشاء. ومع ذلك، فإن حوالي ثلثي المفاعـلات البحثيـة العاملة في العالم يزيد عمرها على 30 عامـاً. والعديـد منها تـم تجديده لتلبية المعايير التقنية الحالية ومتطلبـات الأمان. لكن التحديـات المصاحبة لتقادم المكونات والمواد، بجانب متطلبات الصيانـة والتمويل لتلك المنشآت، تعد قضايا جادة في دول عديـدة. ولحسن الحظ، فإن تلك القضايا تجتذب في الوقت الحالي إنتباهاً متزايداً على نطاق العالم .

2 ـ تصنيف المفاعلات البحثية

تبنى منشآت المفاعلات البحثية لأغراض معينة، فيما يتعلق باستخداماتها ومنافعها. ولذلك، فإن تصنيف أنواع المفاعلات يعد عملية عسيرة بسبب نقص أي توحيد للمقاييس. وفي هذه الدراسة، تصنّف أنواع المفاعلات البحثية وفقاً للمعايير التالية :

أ ـ تستخدم تسميات الجهة المصنّعة للمفاعلات البحثية التي تنتج منها أعداداً ضخمة والتي لديها مصطلحات فنية مفهومة بصورة واسعة، مثل ARGONAUT، TRIGA، SLOWPOKE، IRT، وWWR .

ب ـ تسجل المفاعلات المهدأة و/أو المبردة بالماء الثقيل ضمن قائمة مفاعلات الماء الثقيل (HWRs) .

ج ـ تسجل المفاعلات المزودة بوقود على شكل صفيحة من نوع مفاعل حوض السباحة ضمن قائمة المفاعلات ذات الحوض (Pool reactors) .

د ـ تسجل المفاعلات المبردة والمهدأة بالماء الخفيف بواسطة أنظمة تبريد مغلقة ضمن قائمة المفاعلات ذات الصهريج (Tank reactors) .

هـ ـ تسجل المفاعلات البحثية ذات الوقود والمهدئ المتجانس، صلباً كان أم سائلاً، كمفاعلات متجانسة صلبة أو متجانسة سائلة .

و ـ تسجل المجموعات الحرجة كما هي .

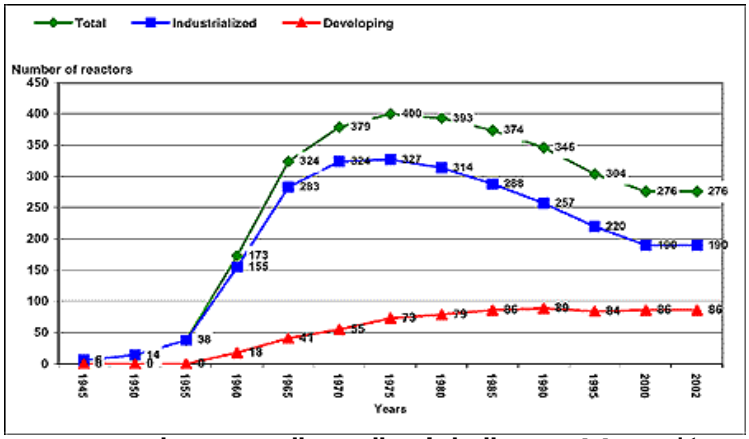
ز ـ من أجل تجنّب عدد ضخم من المفاعلات في الفئة الأخرى، يستخدم وصف قصير لأهم سماتها .

تهدأ التصاميم الأخرى باستخدام الماء الثقيل (12 وحدة) أو الغرافيت. والقليل من المفاعلات البحثية هي مفاعلات سريعة لا تحتاج إلى مهدئ، ويمكنها استخدام خليط من اليورانيوم والبلوتونيوم كوقود. والمفاعلات المتجانسة لديها قلب مفاعل يتضمن محلولاً من أملاح اليورانيوم كسائل يتم احتواؤه في صهريج قطره 300 ملم. وقد اكتسب التصميم البسيط لتلك المفاعلات شعبية في البداية، لكن خمسة منها فقط هي التي ظلّت عاملة حتى الآن .

إن للمفاعلات البحثية مدى واسعاً من الإستخدامات، بما في ذلك تحليل واختبار المواد، وإنتاج النظائر المشعة. وتطبق كفاءاتها في مجالات عديدة، داخل الصناعة النووية وكذلك بحوث الإندماج، العلوم البيئية، تطوير المواد المتقدمة، تصميم الأدوية والطب النووي .

وقد سجلت الوكالة الدولية للطاقة الذرية قوائم لفئات عديدة من المفاعلات البحثية المصنّفة بشكل واسع. وهي تشمل 60 مجموعة حرجة (قدرتها صفر عادة)، 23 مفاعل اختبار، 37 منشأة تدريبية، مفاعلين من النموذج الأول، وهناك واحد منتج للكهرباء. لكن أغلبها للأغراض البحثية بصورة واسعة، برغم أنه يمكن لبعضها إنتاج النظائر المشعة. وكمنشآت علمية باهظة التكاليف، فإنها تتجه لتكون متعددة الأغراض، والعديد منها يشتغل منذ أكثر من 30 عاماً .

تمتلك روسيا معظم المفاعلات البحثية (62)، تليها الولايات المتحدة الأمريكية (54)، اليابان (18)، فرنسا (15)، ألمانيا (14) والصين (13). كما تمتلك دول نامية وصغيرة عديدة مفاعلات بحثية، بما يشمل بنغلاديش، الجزائر، مصر، كولومبيا، غانا، جامايكا، ليبيا، تايلند وفيتنام. وهناك حوالي 20 مفاعلاً بحثياً آخر مخطط لها أو تحت الإنشاء، وعدد 361 مفاعلاً تم إيقافها أو تفكيكها، نصفها تقريباً في الولايات المتحدة الأمريكية. لقد تم إنشاء العديد من المفاعلات البحثية في الستينيات والسبعينيات [2]، وقد بلغ عدد المفاعلات العاملة ذروته عام 1975، بعدد 373 مفاعلاً في 55 دولة، كما هو مبين في الشكل رقم (2) .



شكل رقم (2) : عدد المفاعلات البحثية المبنية منذ عام 1945

3 ـ أنواع المفاعلات البحثية

توجد منظومة من التصاميم المستخدمة في المفاعلات البحثية أكثر إتساعاً من تلك المستخدمة في مفاعلات القوى، حيث أن 80% من المنشآت الموجودة في العالم هي لنوعين متشابهين. كما أن لها أنماط تشغيل مختلفة، لتنتج الطاقة التي قد تكون مستقرة أو نابضة. وفيما يلي نعرض أنواع المفاعلات الرئيسية ذات التصاميم الشائعة .

1.3 ـ مفاعل ARGONAUT

تم بناء المفاعل الأصلي (Argonne Nuclear Assembly for University Training, Argonaut) في مختبر أرغون الوطني ووصل إلى الحرجية للمرة الأولى في 9 فبراير/شباط 1957. وقد تم إيقافه في عام 1972 وبلغ معدل قدرته 10 كيلوواط .

تعمل مفاعلات Argonaut عند مستويات قدرة تتراوح ما بين 2 واط و300 كيلواط. ومعظم مفاعلات Argonaut العاملة قدرتها في حدود 100 كيلوواط. إن تلك المفاعلات ذات عاكس من الغرافيت، مهدأة ومبردة بالماء الخفيف وتعمل بوقود اليورانيوم سواء عالي التخصيب أو منخفض التخصيب[3]. وهناك مجموعة متنوعة من تشكيلات قلب المفاعل الممكنة بدءاً من شريحة (Slab) واحدة، شريحتين (على شكل قوس أو شريحة مستقيمة) أو القلب الحلقي (Annular core) حسب التصميم والإستخدام المقصود :

بيانات تقنية :

القدرة : تصل إلى 100 كيلوواط
مادة الوقود : يورانيوم ـ ألومنيوم
نوع الوقود : صفائح
التخصيب : 93% في النمط القديم، 20% في النمط الحديث
الكثافة القصوى للتدفق النتروني : $10x2^{12}$ نترون سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
مرافق تجريبية : بوابتان للحزم الأفقية، قناة رأسية، عمود حراري، نظامان لانتقال الهواء المضغوط (Pneumatic transfer systems)، بالقرب من مواضع التشعيع بقلب المفاعل.

2.3 ـ مفاعل SLOWPOKE

يمثل المفاعل البحثي (Safe Low Kritical Experiment, Slowpoke) تقانة مفاعل قدرته قليلة ذي قلب مدمج، تم تطويره من قبل مؤسسة AECL الكندية في أواخر الستينيات بمختبرات Whiteshell .

ويعد مفاعل Slowpoke قليل التكلفة وبسيط القدرة من نوع صهريج في حوض (Tank-in-pool). وهو ذو عاكس من البريليوم بكتلة حرجة ضئيلة ويزودنا بتدفقات نترونية أعلى من تلك المتاحة من المسرعات الصغيرة أو من المصادر المشعة. ومعظم مفاعلات Slowpoke معدل قدرتها الإسمية 20 كيلوواط، برغم أنه يمكن تشغيلها عند قدرات أعلى لفترات زمنية أقصر. وقد زادت فترة التشغيل بدون حضور إلى 18 ساعة. وقلب مفاعل Slowpoke-2 يبلغ قطره حوالي 22 سم بارتفاع 22 سم، ويستقر في حوض من الماء الخفيف قطره 2.5 متراً وعمقه 6 أمتار، والذي يقوم بالتبريد عبر الحمل الحراري الطبيعي (Natural convection). وبالإضافة إلى التبريد الكامن (Passive cooling)، فإن لدى المفاعل درجة عالية من "الأمان المتأصل" (Inherent safety)، حيث يمكنه تنظيم نفسه بواسطة أساليب طبيعية كامنة، مثل إبطاء التفاعل المتسلسل إذا زادت سخونة الماء أو تكونت فقاعات. وفي الواقع، تعد تلك الخصائص سائدة بحيث يرخص لمفاعل Slowpoke-2 بالعمل خلال الليل بدون حضور (لكنه يراقب عن بعد) .

يمكن تركيب ما يصل إلى 10 أنابيب تشعيع في وعاء المفاعل، 5 داخلية (كبسولات 7سم^3) و5 خارجية (كبسولات 27 سم^3). وتبلغ مرتبة التدفق الحراري المتاح الأقصى عند الأنبوبة الداخلية 10x1^{12} نترون سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$.

بيانات تقنية :

القدرة : 20 كيلوواط
مادة الوقود : يورانيوم ـ ألومنيوم
نوع الوقود : قضبان
التخصيب : 93%
الكثافة القصوى للتدفق النتروني : 10x1^{12} نترون سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
مرافق تجريبية : 5 مرافق تشعيع بالعاكس، 4 مرافق تشعيع خارج قلب المفاعل، نظام واحد لانتقال الهواء المضغوط .

فيما بين عامي 1976 و1984 تم تفكيك سبعة مفاعلات Slowpoke-2 [4] تعمل بوقود اليورانيوم عالي التخصيب (HEU) في ست مدن كندية وفي مدينة كنغستون بجامايكا. وفي عام 1985 تم تفكيك مفاعل Slowpoke-2 الأول الذي يعمل بوقود اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU) في الكلية الحربية الملكية بكندا (RMC) التي تقع في أونتاريو. ومنذ ذلك الوقت تم تحويل وحدات عديدة إلى اليورانيوم منخفض التخصيب. ولا يزال ستة من المفاعلات الأصلية تعمل حالياً وواحد فقط تم تزويده بوقود إضافي .

تستخدم مفاعلات Slowpoke أساساً للتحليل بالتنشيط النتروني (Neutron Activation Analysis, NAA)، في البحث وكخدمة تجارية، لكنها تستخدم كذلك للتدريس والتدريب ودراسات التشعيع والتصوير بالأشعة النترونية (في كلية RMC بأونتاريو) وإنتاج المقتفيات المشعة. وتتمثل ميزاتها الأساسية في أنها جديرة بأن يعول عليها وكذلك سهولة استخدام هذا التصميم للمفاعل وقابلية التوالد للتدفق النتروني. وبما أن الوقود لم يتم تعديله بالمرة لمدة 20 سنة على الأقل، فإن الطيف النتروني في مواقع التشعيع لم يتغير والتدفق النتروني قابل للتوالد حتى 1% تقريباً .

وبرغم أن جميع الأهداف التقنية لهذا المفاعل تم بلوغها، فإن نقص المبيعات الخارجية كان مخيباً للآمال، فقد استولت النسخة الصينية على السوق .

3.3 ـ مفاعل MNSR

هو النسخة الصينية من مفاعل Slowpoke، ويرمز إليه بـ MNSR، تبلغ قدرته الإسمية 27 كيلوواط بخصائص أداء مشابهة. لقد بني الصينيون المفاعل (Miniature Neutron Source Reactor, MNSR) كمفاعل صغير مدمج قدرته بسيطة (أقل من 30 كيلوواط) مبني على أساس التصميم الكندي لمفاعل SLOWPOKE. ومفاعل MNSR من نوع صهريج في حوض، بوقود عالي التخصيب (حوالي 90% يورانيوم-235). والصهريج مغمور في حوض واسع، وقلب المفاعل بدوره مغمور في الصهريج. تصل القدرة الإسمية القصوى إلى حوالي 30 كيلوواط، وتتم إزالة القدرة بالحمل الحراري الطبيعي. يتكون القلب

المركزي من حوالي 347 قضيب وقود، مع 4 قضبان ربط و3 عناصر زائفة (Dummy elements) موزعة على مجموع عشر دوائر، تتكون كل منها من عدد من قضبان الوقود يتراوح بين 6 و62. يتم التحكم في المفاعل بقضيب تحكم مركزي واحد، ويحاط قلب المفاعل بعاكس من البريليوم .

عند القدرة الإسمية (Nominal power)، يكون التدفق الحراري الأقصى $10x1^{12}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$ وفي النسخة العيارية يمكن تشغيل مفاعل MNSR لحوالي 2 إلى 3 ساعات في اليوم عند هذه القدرة. ويعد مفاعل MNSR أداة مفيدة للغاية لتعلّم فيزياء المفاعل والتدريب عليها وللتحليل بالتنشيط النتروني قصير الأمد، لذلك أصبح هذا المفاعل شعبياً بصورة متزايدة في الدول النامية حيث أنه المفاعل البحثي الأرخص المتاح في الوقت الحاضر .

تقوم الصين بتشغيل مفاعلين من نوع MNSR، كما أنها زودت كل من غانا، إيران، باكستان، نيجيريا وسورية بمفاعلات من هذا النوع، وكذلك بيورانيوم مخصب لتزويد تلك المفاعلات بالوقود [5] .

بيانات تقنية :

القدرة : 30 كيلوواط

التدفق الحراري الأقصى في الحالة المستقرة : $10x1^{12}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

التدفق السريع الأقصى في الحالة المستقرة : $10x3^{12}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

المهدئ : الماء الخفيف

المبرد : الماء الخفيف

العاكس : بريليوم، ماء

مادة الوقود : UAl_x-Al ، يورانيوم مخصب بنسبة 93% U^{235}.

نوع الوقود : قضبان

مادة التغليف : سبيكة ألومنيوم

سرعة المبرد : 10 ملم/ثانية .

4.3 ـ مفاعلات TRIGA

إن مفاعلات (Training, Research, Isotopes, General Atomics, TRIGA) متعددة الإستعمالات والأغراض وموزعة على نطاق العالم بما يزيد على 65 منشأة في 24 دولة. وقد تم تصميمها وتصنيعها من قبل مؤسسة (General Atomics, GA) بالولايات المتحدة الأمريكية. وتتراوح مستويات قدرتها من 18 كيلوواط إلى 3 ميغاواط مع كون مستويات التشغيل الأكثر شيوعاً هي 250 كيلوواط إلى 1 ميغاواط [7،6]. وقد قامت مؤسسة GA ببناء مفاعل اختباري لغرض خاص بقدرة 14 ميغاواط في رومانيا. يتكون قلب المفاعل من 60 ـ 100 عنصر وقود أسطواني، قطر كل منها حوالي 36 ملم مغلفة بالألومنيوم الذي يطوق خليطاً من وقود اليورانيوم وهيدريد الزركونيوم (كمهدئ). يستقر القلب في حوض من الماء ويستخدم عادة الغرافيت أو البريليوم كعاكس. يمكن لهذا النوع من المفاعل أن ينبض بأمان إلى مستويات قدرة عالية جداً (25,000 ميغاواط مثلاً) خلال أجزاء من الثانية. ويعطي وقوده معامل حرارة سلبي قوي جداً لمفاعل TRIGA، وتنقطع الزيادة السريعة في القدرة بسرعة بتأثير التفاعلية السلبية لمهدئ الهيدريد .

عناصر الوقود عبارة عن قضبان أسطوانية مغلفة بالصلب الذي لا يصدأ، يبلغ طولها الإجمالي 72 سم بقطر 3.7 سم. مادة الوقود طولها 38 سم ولديها 8 إلى 10 سم من الكبسولات الغرافيتية عند النهايات السفلية والعلوية تعمل كعاكسات. ويوجد ثقب قطره 0.635 سم عبر مركز قضبان الوقود محشو بقضيب زركونيوم. الوقود عبارة عن خليط متجانس من اليورانيوم وهيدريد الزركونيوم، ونسبة تخصب اليورانيوم في الوقود تبلغ 20% في حين أن محتوى اليورانيوم يبلغ 12% من حيث الوزن .

بيانات تقنية :

نوع المفاعل : TRIGA KARK II
القدرة : 250 كيلوواط
التدفق الحراري الأقصى في الحالة المستقرة : $10x1^{13}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

التدفق السريع الأقصى في الحالة المستقرة : $10x1.2^{13}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

التدفق الحراري النابض الأقصى : $10x1^{16}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

التدفق السريع النابض الأقصى : $10x1.2^{16}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

المهدئ : الماء الخفيف، هيدريد الزركونيوم

المبرد : الماء الخفيف

العاكس : غرافيت

نوع الوقود : قضبان

سرعة المبرد : 0.161 متر/ثانية

قضبان التحكم : 3 قضبان $B_4 C$

مادة التغليف : SS-304

مادة الوقود : U-Zr-H، LEU

يتضمن الملحق (أ) معلومات تفصيلية عن المفاعلات البحثية TRIGA .

5.3 ـ مفاعلات اختبار المواد (MTR)

يعد هذا المفاعل الأكثر وفرة من بين أنواع المفاعلات المذكورة. ووجود اختلافات واسعة في التصميم يجعل من الصعب وصف تصميم عياري له. التصميم الشائع (67 وحدة) هو المفاعل ذو الحوض، حيث قلب المفاعل عبارة عن عنقود (Cluster) من عناصر الوقود (وقود على شكل صفائح في تشكيلة مستطيلة) يقع في حوض واسع من المياه. ويمكن تبريده بالقوة (قدرة أكبر من 100 كيلوواط) أو تبريده بالحمل الحراري الطبيعي للماء الخفيف. ويمكن أن يتم الإنعكاس بالماء، بالغرافيت (الأغلبية)، بالبريليوم أو بصهاريج الماء الثقيل في جانب واحد أو أكثر. تتراوح قدرة التشغيل من عدد قليل بالواط إلى عدة عشرات بالميغاواط. وبرغم أن معظم المفاعلات في هذه الفئة تعمل بقلوب مستطيلة، فإن العديد منها يعمل بتشكيلات مختلفة. وتقدم المفاعلات ذات الحوض عدة إمكانيات لتشكيل قلب المفاعل من أجل الأداء أو لأسباب اقتصادية عن طريق تحريك أو إزالة واحد أو أكثر من عناصر الوقود أو عناصر العاكس. وبين عناصر الوقود توجد قضبان التحكم وقنوات خالية لمواد تجريبية. كل عنصر يتضمن عدة صفائح

(18 أو 19 مثلاً) من الوقود المغلف بالألومنيوم المستقيم أو المنحني في صندوق عمودي. يعمل الماء كمهدئ ومبرد للمفاعل، ويستخدم الغرافيت أو البريليوم عادة للعاكس، على الرغم من أنه يمكن استخدام مواد أخرى. وتهيأ فتحات في حائط الحوض لدخول حزم النترونات[8]. تعد المفاعلات البحثية من نوع الصهريج (32 وحدة) متشابهة، عدا أن التبريد يكون أكثر فعالية .

بيانات تقنية :

القدرة : تصل إلى 20 ميغاواط
مادة الوقود : U-Al (كأكاسيد أو سليسيدات)
نوع الوقود : صفائح
التخصيب : 90% سابقاً، تحولت بشكل أساسي إلى 20%
الكثافة القصوى للتدفق النتروني : $10x2.7^{14}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
مرافق تجريبية نموذجية : 10 قنوات أفقية، 4 مرافق تشعيع بقلب المفاعل، 12 مرفق تشعيع بالعاكس، نظامان لانتقال الهواء المضغوط .

يتضمن الملحق (ب) معلومات تفصيلية عن المفاعلات البحثية من نوع MTR .

6.3 ـ مفاعل MAPLE

يطلق إسم (Multipurpose Applied Physics Lattice Experiment, MAPLE) على تقانة المفاعل البحثي الجديد التي طورتها مؤسسة AECL الكندية، وهو القادر على اختبار المواد والوقود، التجارب العلمية للنترونات وإنتاج جزء كبير من النظائـر الطبية في العالم، وخصوصاً الموليبدنوم-99 والكوبالت-60 الطبي والزينون-133 واليود-131 واليود 125 .

يتّسم مفهوم مفاعل MAPLE بقلب مبرد بالماء وذي عاكس من الماء الثقيل (D_2O)، ويعمل بقدرة حرارية تبلغ 5 إلى 40 ميغاواط. وهو يتسم بتدفق نترونات حرارية عالٍ، حجم صغير لقلب المفاعل، وتجهيز بأنابيب حزمية متعددة ومواقع تجريبية داخل القلب، بالإضافة إلى مرافق خاصة بالطيف المشتق في العاكس (مصدر للنترونات الباردة، مصيدة تدفق للنترونات السريعة، إلخ) [9] .

لقد تم بناء منشأة تحتوي على مفاعلين بقدرة 10 ميغاواط لكل منهما في مايو/أيار 2000 في مختبرات Chalk Riva التابعة لمؤسسة AECL الكندية. وكانت قد منحت ترخيصاً بالتشغيل في أغسطس/آب 1999 لمفاعل MAPLE I وتوسعت لتضم مفاعل MAPLE II في يونيو/حزيران 2000. وقد بدأت في الحال اختبارات التجهيز للخدمة الفعلية، ببلوغ مفاعل MAPLE I تفاعله المستدام الأول في فبراير/شباط 2000 وتبعه مفاعل MAPLE II في أكتوبر/تشرين الأول 2003. ومع ذلك، فقد لوحظ أثناء الاختبار أن بعض قضبان الإيقاف الطارئ في مفاعل MAPLE I قد تخفق في الانتشار في مواقف الإقتضاء الحقيقية. وقد أعزى هذا الإخفاق إلى قضايا التصميم والمهارة العملية، والجسيمات المعدنية الدقيقة التي تتراكم في غطاء قضيب التحكم وتتدخل في حركته الحرة. نتيجة لذلك، توقف المشروع بأكمله منذ يوليو/تموز 2000، بينما تمت إعادة تصميم نظام قضيب التحكم ليتمتع بتحمل تشغيلي أكبر، وجرى تركيب النظام الجديد وإعادة اختباره. وعلاوة على التأخير الذي استمر لمدة أربع سنوات حتى الآن في بدء الإنتاج التجاري، فإن المشروع قد تجاوز تكلفته الأصلية. وتقوم مؤسستا AECL و MDS Nordion حالياً بالتوسط لإيجاد تسوية بشأن إصلاح مستقبل المشروع، وخاصة بالتشارك في التكاليف المتزايدة .

لقد تم التصريح بأن MMIR-1، المفاعل الأول من المفاعلين الجديدين بتقانة MAPLE لإنتاج النظائر الطبية، قد أصبح "حرجاً" (أي بدأ تفاعلاً تسلسلياً مستداماً) منذ الساعة 2.53 من يوم السبت الموافق 19 فبراير/شباط 2000 في مختبرات Chalk River. وهذا هو المفاعل الأول في العالم في الألفية الجديدة. إن بلوغ الحرجية يعد حدثاً هاماً على الطريق نحو التجهيز الكامل للخدمة الفعلية. أما MMIR-2 فقد بلغ الحرجية لأول مرة في عام 2003. ويستمر كلا المفاعلين في التجهيز للخدمة الفعلية .

يتضمن الملحق (ج) معلومات تفصيلية عن المفاعل البحثي HANARO بكوريا الجنوبية، والذي تم تصميمه وبناؤه على أساس تقانة MAPLE الكندية .

7.3 ـ مفاعلات التدفق العالي (High Flux Reactors, HFR)

المنشأتان الأكثر أهمية هما مفاعل التدفق العالي (HFR) في Patten بهولندا ومفاعل النظائر ذات التدفق العالي (HFIR) في ORNL .

1.7.3 ـ مفاعل التدفق العالي (HFR) في Patten بهولندا

يملكه معهد الطاقة (IE) التابع لمركز البحوث المشتركة (JRC) للمفوضية الأوروبية [10]. منذ عام 1962، عهد بتشغيله لمجموعة استشارية مختصة ببحوث الطاقة (NRG) في هولندا. ومنذ فبراير/شباط 2005 أصبحت مجموعة NRG هي صاحبة الترخيص كذلك في مفاعل HFR .

بيانات تقنية :

القدرة الحرارية : 45 ميغاواط
التدفق الحراري الأقصى : $10x2.5^{14}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
التدفق السريع الأقصى في الحالة المستقرة : $10x4.6^{14}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
المهدئ : الماء الخفيف
المبرد : الماء الخفيف
العاكس : بريليوم
مادة الوقود : UAl_x-Al، يورانيوم مخصب بنسبة 93% U^{235} (تحول في عام 2005 إلى يورانيوم منخفض التخصيب)
مادة التغليف : سبيكة ألومنيوم
سرعة المبرد : 7 متر/ثانية
متوسط الإستحراق وقت التفريغ : 50%

يتضمن الملحق (د1) معلومات تفصيلية عن مفاعل التدفق العالي (HFR) في Patten .

2.7.3 ـ مفاعل النظائر ذو التدفق العالي (HFIR) في ORNL

إن أحد الأغراض الأصلية الرئيسية لمفاعل HFIR هو إنتاج الكاليفورنيوم-252 ونظائر ما بعد اليورانيوم أخرى من أجل التطبيقات البحثية والصناعية والطبية. وتنتج تلك المواد في مصيدة التدفق بمركز عنصر الوقود في مفاعل HFIR حيث يتوفر تدفق النترونات الحرارية العاملة بمقدار $10x2.0^{15}$ نترون.سم$^{-2}$ ثانية$^{-1}$ لتشعيع المادة الهدف. كما تزود مرافق تشعيعية إضافية في عاكس البريليوم .

وبخلاف مساهماتها في إنتاج النظائر، تقدم أيضاً مفاعلات النظائر ذات التدفق العالي (HFIR) مجموعة منوعة من اختبارات التشعيع والتجارب التي تستفيد من التدفق النتروني العالي المتوفر على نحو إستثنائي. وفي مصيدة التدفق بعنصر الوقود، تقدم أنبوبة حاوية مائية مدخلاً للتدفق النتروني الحراري العالي في المفاعل لتشعيعات قصيرة الأمد، وتكون مواضع أخرى مثالية لدراسات حول ضرر التشعيع بالنترونات السريعة. في عام 1986 أدخل تعديل على مرافق تجريبية لمصيدة التدفق في موقعين بمنطقة التدفق الأقصى واللذين يمكن تجهيزهما بكبسولات مزودة بأجهزة قياس وبحلقات هندسية. يحتوي عاكس البريليوم على مرافق تجريبية متعددة بتدفقات نترونية حرارية تصل إلى $10x1.0^{15}$ نترون.سم$^{-2}$ ثانية$^{-1}$. هذه المرافق يمكن تجهيزهـا بكبسولات تجريبية سكونية (Static experimental capsules)، وبحلقات هندسية معقدة لاختبار الوقود وبتشعيعات نظائرية تجريبية خاصة [11] .

بيانات تقنية :

القدرة الحرارية : 85 ميغاواط
التدفق الحراري الأقصى في الحالة المستقرة : $10x2.5^{15}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
التدفق السريع الأقصى في الحالة المستقرة : $10x1.0^{15}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
المهدئ : الماء الخفيف
المبرد : الماء الخفيف
العاكس : بريليوم
مادة الوقود : U_3O_8-Al، يورانيوم مخصب بنسبة 93% ^{235}U (تحول في عام 2005 إلى يورانيوم منخفض التخصيب)
مادة التغليف : سبيكة ألومنيوم
سرعة المبرد : 16.2 متر/ثانية
قضبان التحكم : 5 قضبان من اليوروبيوم
متوسط الإستحراق (Burn up) وقت التفريغ : 67%

يتضمن الملحق (د2) معلومات تفصيلية عن مفاعل النظائر ذي التدفق العالي (HFIR) في ORNL .

8.3 ـ مفاعلات إنتاج النظائر المشعة

المفاعل الأكثر حداثة من هذا النوع هو مفاعل (Open Pool Australian Light-water reactor, OPAL)، وتبلغ قدرته 20 ميغاواط ويعد منشأة نووية متعددة الأغراض من أجل بحوث علوم المواد والبحوث النووية المتقدمة التي تتضمن تدفقات نترونية عالية [12]. كمفاعل إنتاجي، فإنه سيزود نظائر مشعة مختلفة لكل أستراليا ومعظم الأسواق البحثية والصناعية والطبية في جنوب شرق آسيا. ينسب هذا المفاعل إلى منظمة العلوم والتقانات النووية الأسترالية (Australian Nuclear Science & Technology Organization, ANSTO) وهو مقام في مركز العلوم والتقانات الواقع في مرتفعات Lucas على بعد 35 كيلومتراً جنوب غرب مدينة سيدني. لقد حلّ مفاعل OPAL محلّ مفاعل HIFAR، وهو المفاعل البريطاني الذي يعود تاريخه إلى الخمسينيات، والذي تم تفكيكه مؤخراً .

بيانات تقنية :

القدرة الحرارية : 20 ميغاواط

التدفق الحراري الأقصى في الحالة المستقرة : $10x3.0^{14}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

التدفق السريع الأقصى في الحالة المستقرة : $10x2.12^{14}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

المهدئ : الماء الخفيف

المبرد : الماء الخفيف

العاكس : الماء الثقيل

مادة الوقود : U_3Si_2-Al_x، يورانيوم منخفض التخصيب

مادة التغليف : سبيكة ألومنيوم

سرعة المبرد : 9.0 متر/ثانية

قضبان التحكم : 5 قضبان من الفضة، الإنديوم، الكادميوم

يتضمن الملحق (هـ) معلومات تفصيلية عن مفاعل OPAL .

4 ـ وقود المفاعلات البحثية

تكون مجموعات الوقود، نموذجياً، في شكل صفائح أو أسطوانات من سبيكة يورانيوم ـ ألومنيوم (U-Al) مغلفة بألومنيوم نقي. وهي مختلفة عن أقراص ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) الموضوعة في مغلف من سبيكة الزركونيوم (Zircaloy) والمستخدمة في مفاعلات القوى. ونحتاج فقط إلى كيلوغرامات قليلة من اليورانيوم لتزويد مفاعل بحثي بالوقود، برغم كونها عالية التخصيب بصورة أكبر (بالمقارنة مع، ربما، مائة طن في مفاعل قوى). يسمح اليورانيوم عالي التخصيب (HEU->20%^{235}U) بقلوب مدمجة بشكل أكبر، مع تدفقات نترونية عالية وفترات زمنية طويلة فيما بين إعادة التزود بالوقود. لذلك، فإن مفاعلات عديدة إستعملته حتى السبعينيات، وفي عام 2004 كان أكثر من 60 مفاعلاً بحثياً مدنياً لا يزال يستعمله. ومنذ أوائل السبعينيات تصاعدت الإهتمامات الأمنية، وخاصة منذ أنشئت مفاعلات بحثية في الجامعات ومواقع مدنية أخرى بإجراءات أمنية أقل كثيراً من منشآت الأسلحة العسكرية حيث تتواجد كميات أكبر بكثير من اليورانيوم عالي التخصيب (HEU). ومنذ عام 1978، فإن مفاعلاً واحداً فقط هو مفاعل FRM-II في Garching بألمانيا تم بناؤه بوقود HEU، بينما تم تجهيز 21 مفاعلاً للخدمة الفعلية بوقود منخفض التخصيب (LEU) في 16 دولة [2] .

تعد قضية التخصيب مركز الإهتمام الرئيسي للتقييم الدولي لدورة الوقود النووي الذي تكفلت به الأمم المتحدة في عام 1980. لقد توصل هذا التقييم إلى إستنتاج أنه للحذر من إنتشار الأسلحة المصنّعة من وقود اليورانيوم عالي التخصيب، الشائع إستخدامه في المفاعلات البحثية آنذاك، لا بد من خفض نسبة التخصيب إلى ما لا يتجاوز 20% ^{235}U. وقد سبق ذلك مبادرة مشابهة من قبل الولايات المتحدة الأمريكية في عام 1978، عندما أطلقت برنامجها من أجل "تخصيب منخفض للمفاعلات البحثية والإختبارية" (RERTR). إن معظم المفاعلات البحثية المستخدمة لوقود اليورانيوم عالي التخصيب قدمتها الولايات المتحدة الأمريكية وروسيا، ومن ثم فإن الجهود المبذولة للتعامل مع تلك المشكلة تقع على عاتقهما. ويركز برنامج RERTR على المفاعلات التي تزيد قدرتها على 1 ميغاواط، والتي لديها إحتياجات هامة من الوقود. وقد أدت تلك البرامج إلى

تطوير وتأهيل وقود جديد من اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU) وعالي الكثافة. لقد بلغت الكثافة الأصلية للوقود حوالي 1.3 ـ 1.7 غرام/سم^3 يورانيوم. وبتخفيض التخصيب، فإن ذلك يعني أن الكثافة يجب زيادتها. في البداية وصلت الكثافة إلى 2.3 ـ 3.2 غرام/سم^3 مع الأنواع الموجودة من وقود يورانيوم ـ ألومنيوم.

لقد تم تحويل 38 مفاعلاً بحثياً (11 في الولايات المتحدة الأمريكية) أو يتم تحويلها إلى وقود سليسيد اليورانيوم منخفض التخصيب، وهناك 36 مفاعلاً آخر قابلة للتحويل باستخدام وقود حالي. ويحتاج 31 مفاعلاً آخر ذات تصاميم روسية في الأغلب، إلى وقود كثافته أعلى ليس متوفراً حتى الآن. إن الهدف المنشود هو تحويل 105 مفاعلات بحلول عام 2013، ويتوقع حينها إغلاق بعض مفاعلات اليورانيوم عالي التخصيب (HEU) الأخرى. وقد انحدرت صادرات الولايات المتحدة من HEU من 700 كيلو غرام/سنة في منتصف السبعينيات إلى صفر تقريباً بحلول عام 1993 .

بذل الإتحاد السوفيتي السابق جهوداً مشابهة منذ عام 1978، وأنتج وقوداً كثافته 2.5 غرام/سم^3 بتخفيض نسبة التخصيب من 90% إلى 36%. كما أوقف صادراته من الوقود المخصب بنسبة 90% خلال الثمانينيات. ومع ذلك، فإن عدد المفاعلات البحثية الروسية التي تم تحويلها إلى إستخدام وقود اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU) قليل حتى الآن. لقد استخدم الجيل الأول من وقود LEU اليورانيوم والسليكون (U_3Si_2-Al) "سليسيد اليورانيوم متبعثراً (Dispersed) في الألومنيوم"، بكثافة 4.8 غرام/سم^3. وكانت هناك إختبارات ناجحة بصفائح وقود أكثف (U_3Si-Al) تصل إلى 6.1 غرام/سم^3، لكن تطوير الولايات المتحدة لتلك الأنواع من وقود السليسيد توقف في عام 1989 ولم يستأنف حتى عام 1996. وهناك جهود دولية جارية من أجل تطوير، تأهيل وترخيص وقود عالي الكثافة مبني على سبيكة اليورانيوم ـ موليبدنوم (U-Mo) المتبعثرة في الألومنيوم، بكثافة تبلغ 6 ـ 8 غرام/سم^3. والمنظمات الأساسية المشاركة في تلك الجهود هي برنامج RERTR الأمريكي في مختبر أرغون الوطني (ANL) منذ عام 1996، مجموعة U-Mo الفرنسية المؤلفة من "CAE, CERCA, COGEMA,

"Framatome-ANP & Technicatome منذ عام 1999 وهيئة الطاقة الذرية الأرجنتينية (CNEA) منذ عام 2000. وقد تم الشروع في هذا العمل التطويري للتزويد بوقود يمكنه توسيع إستخدام LEU في تلك المفاعلات التي تحتاج إلى كثافات أعلى من المتاحة في تبعثرات السليسيد ولتقديم وقود يمكن أن تعاد معالجته بسهولة أكبر من نوع السليسيد. كان من المتوقع أن تتم المصادقة على هذا الوقود في عام 2006، لكن الإختبارات التي أجريت منذ عام 2003 فشلت في تأكيد الأداء بسبب التورم غير المستقر (Unstable swelling) عند التشعيع العالي، وحالياً فإن الموعد المحدد لإنجاز ذلك هو عام 2010.

في روسيا، تم تأسيس برنامج RERTR روسي موازي من قبل وزارة الطاقة الذرية الروسية (MINATOM). ويعمل برنامج RERTR الأمريكي منذ عام 1999 على تطوير وقود U-Mo بكثافة 2 ـ 6 غرام/سم^3 للإستخدام في المفاعلات البحثية والإختبارية روسية التصميم. وبرغم ذلك، فإن هذا أيضاً لا يحقق التوقعات المرجوة .

وفي مرحلة أبعد من تطوير وقود U-Mo الذي أصبح الآن له الأولوية الأولى، تقوم كل من "ANL, CEA & CNEA" باختبار وقود يورانيوم ـ موليبدنوم في شكل وحدة متراصة، بدلاً من تبعثر U-Mo في الألومنيوم. إن كثافة اليورانيوم تبلغ 15.6 غرام/سم^3، وهذا ما سوف يمكّن كل مفاعل بحثي في العالم من التحول من وقود HEU إلى وقود LEU دون خسارة في الأداء. والموعد المنشود لإتاحة ذلك هو عام 2010. ومن الجدير بالذكر أن جميع الوقود مغلف بالألومنيوم .

5 ـ الوقود المستهلك من المفاعلات البحثية

يمكن إعادة معالجة وقود يورانيوم ـ ألومنيوم (U-Al) بواسطة مؤسسة Cogema في فرنسا، كما يمكن إعادة معالجة وقود يورانيوم ـ موليبدنوم (U-Mo) هناك أيضاً. أما وقود U-Si و TRIGA فلم يتم معالجتهما بسهولة في منشآت تقليدية. ومع ذلك، فقد أكدت منشأة تشغيل تجارية واحدة على الأقل أن وقود U-Si يمكن إعادة معالجته في المصانع المتواجدة إذا تم تخفيفه بكميات ملائمة من أنواع وقود أخرى، مثل U-Al .

وللإجابة على المخاوف بشأن التخزين المؤقت للوقود المستهلك من المفاعلات البحثية حول العالم، أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية برنامجاً لاستعادة الوقود المستهلك الأمريكي المنشأ من أجل التخلص منه. وتم استرجاع حوالي نصف طن من اليورانيوم-235 من هذا الوقود (HEU). وببلوغ وقت انتهاء البرنامج بتفريغ الوقود في عام 2006، كان من المتوقع أن يكون وقود U-Mo متوفراً. وبسبب تفويت الموعد المحدد، فإن برنامج استعادة الوقود الأمريكي قد تم تمديده لعشر سنوات. يحتاج التخلص من الوقود عالي التخصيب أو حتى المخصب بنسبة 20% إلى مواجهة مشاكل الحرجية ويحتاج إلى استعمال ماصات نترونية أو التخفيف أو نشره بطريقة ما. في روسيا، يهدف برنامج موازي ثلاثي الأطراف يشمل أيضاً الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) والولايات المتحدة الأمريكية، إلى تحريك طنين إثنين من HEU و2.5 طناً من LEU من الوقود المستهلك إلى مجمع إعادة المعالجة في Mayak قرب Chelyabinsk على مدى عشر سنوات حتى 2012. هذا البرنامج الروسي لاستعادة وقود المفاعلات البحثية (RRR FRP) تصـور 38 شحنة (من الوقود الحديث والمستهلك) من عشر دول على مدى الأعوام 2005 ـ 2008، ثم 8 شحنات أو أكثر من ست دول لإزالة جميع وقود HEU الذي تم تفريغه قبل تحويل المفاعلات إلى وقود LEU أو إيقافها. هناك 17 دولة لديها مفاعلات بحثية زودها بها الاتحاد السوفيتي السابق، وهناك 25 من تلك المفاعلات خارج روسيا، 15 منها لا تزال عاملة. ومنذ إنضمام ليبيا إلى البرنامج في عام 2004، لم تعارضه إلاّ كوريا الشمالية فقط [2] .

6 ـ إستخدام المفاعلات البحثية

إن الدور الأكثر أهمية للمفاعلات البحثية هو لإنتاج النترونات. ويمكن استخدام النترونات فيما يلي [13] :

أ ـ تحليل بنية المادة. وتساعد هذه الإستقصاءات في تطوير مواد أفضل للإستعمال في قطع المحركات، مواد مغنطيسية أفضل، موصلات فائقة أفضل ومواد أفضل لتطبيقات أخرى .

ب ـ دراسات ضرر الإشعاع لتطوير مواد أفضل لتطبيقات نووية وصناعية .

ج ـ التحليل بالتنشيط النتروني لتعيين التراكيز العنصرية في المادة بدقة.

د ـ إنتاج النظائر التي تستخدم في البيولوجيا والطب والزراعة والصناعة والهيدرولوجيا والبحوث .

هـ ـ تدريب العلميين والمهندسين والفنيين اللازم لدعم صناعة القدرة النووية .

1.6 ـ دراسات بنية المادة

1.1.6 ـ دراسات ضرر الإشعاع

لقد تم تطويـر أجهزة تشعيع تستعمل تقانات تشعيع فنية متخصصة من أجل جميع المفاعلات البحثية العاملة تقريباً حول العالم، لدراسة القضايـا ذات الصلة بتقادم المواد والمكونات وتقصف النترون (Neutron embrittlement)، في سبيل الحصول على بيانات تشعيع عالية الجودة لدعم نمذجة آليات تقصف الإشعاع. وتهـدف الإستقصاءات أساساً إلى تحسين التكهن بامتداد أعمار أوعية الضغط بالمفاعلات (Reactor Pressure Vessels, RPVs)، بالمقارنة كذلك مع بيانات مراقبة تلك الأوعية، وكفاءة تقنيات الإختبارات اللاّإتلافية الجديدة لكي تتمم الطرق الإتلافية. إن كلا من المواد المبنية على أساس غربي أو روسي تكون متضمنة في الأنشطة المختلفة، والتي تم الشروع بها أساساً كمشاريع تعاونية دولية بلاعبين رئيسيين في الإتحاد الأوروبي والدول المرشحة للإنضمام له والدول المستقلة حديثاً (NIS) في آسيا الوسطى. ويجري البحث في سياق واسع لدعم منشآت القدرة النووية العتيقة في الإتحاد الأوروبي والدول المجاورة له مباشرة . [10]

2.1.6 ـ الإختبارات اللاّإتلافية بالنترونات

تستخدم التقانة التشخيصية لتحسين المعرفة ببنى المواد وبعيوبها. ويعد التصوير بالأشعة النترونية إجراء إستقصائياً حديثاً، مشابهاً للتحليل بالأشعة

السينية، ولكن باستخدام النترونات. يتم تسجيل "الصورة" على وريقة (Foil) حساسة للنترونـات (غادولينيوم، ديسبروسيوم) والتي تُنشّط فيلماً بفوتونات منتجـة في وريقة محول (Converter foil) بواسطة التفاعل التبادلي النتروني (Neutron interaction). وتتمثل التطبيقات الحاليـة في دراسات التآكـل بالألومنيوم (صناعة الطائرات)، سلوك الرطوبـة في مواد البناء، توزع الهيدروجين والزيوت و/أو المزلقات في الأجهزة الميكانيكية [13] .

هذه الطريقة قابلة للتطبيق كذلك في التصوير المقطعي الطبقي (Tomography) للحواسيب بواسطة الحزم النترونية للحصول على معلومات عن موقع حيزي (Spatial location) من مسقط ثنائي الأبعاد. تعد هذه التقنية تحت التطوير ويبدو أنها واعدة للمستقبل .

متطلّبات المفاعل

التدفق النتروني : $10x5^{11}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$
أنظمة لأنابيب الحزم النترونية ومجمعاتها

2.6 ـ التحليل بالتنشيط النتروني

إن التحليل بالتنشيط النتروني (NAA) هو طريقة عالية الحساسية لتعيين التراكيز العنصرية في المادة بدقة. وتلك الحساسية كافية لقياس عناصر معينة بمستوى النانوغرام أو أقل [3]. وتبنى طريقة NAA على كشف وقياس أشعة غاما المميزة الصادرة من النظائر المشعة والناتجة في العينة عند تشعيعها بالنترونات. يتم تشعيع العينات ذات التراكيز العناصرية غير المعلومة بنترونات حرارية في مفاعل نووي، مع وجود مواد عيارية ذات تراكيز عناصرية معلومة. وتمتص النترونات في نوى ذرات المكونات، وبعد ذلك تصدر هذه النوى إشعاعاً ذا طاقة وكمية خاصة بالعنصر المفرد. يعد هذا الإشعاع الصادر بمثابة "بصمة إصبـع" للعنصر، وكمية الإشعاع التي تطلق عند طاقة معينـة هي دلالة على كمية العنصر الموجودة في العينة. إن مقارنة أنشطة معينة مستحثة في العينات العياريـة وتلك المجهولـة تزودنـا بقاعـدة لحساب وفرة العناصر. ونتيجـة

هذا التحليـل، يصدر تقريـر معطيـاً تراكيـز العناصـر في العينـة المجهولـة .

واطريقة التحليل بالتنشيط النتروني تطبيقات نموذجية في الجيولوجيا وتقصي الجرائم وعلم الآثار والفن والطب .

متطلّبات المفاعل

التدفق النتروني : $10x1^{11}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

الأجهزة الضرورية

جهاز تحليل متعدد القنوات وعالي الجودة مع كواشف أشباه الموصلات وحاسوب ذو برمجيات معينة. نظام لتحضير العينة ونقلها .

3.6 ـ إستخدام المفاعلات في الطب

يمكن تصنيع النظائر المشعة بطرق عديدة، أكثرها شيوعاً بالتنشيط النتروني في مفاعل نووي. وهذا يتضمن أسرنترون (المادة الهدف) بواسطة نواة ذرة مما يسبب زيادة في النترونات (غني بالنترونات). وبعض النظائر المشعة تصنّع في سيكلوترون (مسرع حلزوني) حيث تدخل البروتونات إلى النواة، مسببة نقص في النترونات (غني بالبروتونات). وعادة تصبح نواة النظير المشع مستقرة عن طريق إصدار جسيم ألفا و/أو بيتا (أو بوزترون). وقد تكون تلك الجسيمات مصحوبة بإصدار طاقة في صورة أشعة غاما. وتعرف هذه العملية بالإضمحلال الإشعاعي .

النظائر المشعة في الطب

يشار إلى النظائـر المشعـة المستخدمـة في الطب كمواد صيدلانية مشعة، وتستخدم في الطب النووي للتشخيص وكذلك للعلاج. وفي الجدول (1) تم تقسيم بعض أكثر النظائـر إستعمالاً وشيوعاً في الطب النووي إلى مجموعات [10] .

جدول رقم (1)

بعض النظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي

النظير	عمر النصف/يوم	الإستخدام	الأمراض
موليبدنوم-99/ تكنشيوم-99m	0.25/2.75	تشخيصي	السرطان : الرئة، الدماغ، القلب، ووظائف الكلية والغدة الدرقية/الإصابات/ أمراض العظام
يود-131	8.04	علاجي	أمراض الغدة الدرقية
زينون-133	5.25	تشخيصي	وظيفة الرئة
سترنشيوم-89	50.5	تخفيف الألم	الإنتقالات الورمية في العظام
إريديوم-192	73.8	علاجي	السرطان : الرقبة/ الرئة/ العنق/ الفم/ اللّسان
ساماريوم-153	1.89	تخفيف الألم	الإنتقالات الورمية في العظام. في التطوير لعلاجات جديدة
رنيوم-186	3.78	تخفيف الألم	الإنتقالات الورمية في العظام
يود-125	60.1	علاجي	السرطان : بروستات/ عيون
يتريوم-90	2.67	تخفيف الألم	إلتهاب المفاصل
إربيوم-169	9.4	تخفيف الألم	إلتهاب المفاصل
لوتشيوم-177	6.71	علاجي	أنواع مختلفة من السرطان
هولميوم-166	1.12	علاجي	في التطوير : الكبد/سرطان الدم وعلاجات أخرى

هناك ميدان علاجي جديد هو العلاج باستهداف ألفا (Targeted Alpha Therapy, TAT)، وخاصة للتحكم في انتشار السرطان. إن المدى القصير لإصدارات ألفا الطاقية جداً في النسيج يعني أن جزءاً كبيراً من تلك الطاقة يذهب إلى داخل الخلايا السرطانية المستهدفة، في حال أخذ حامل (Carrier) النويدات المشعة المصدرة لألفا إلى الموضع الصحيح بالضبط. ومن الجدير بالذكر أن

الدراسات المخبرية مشجعة والتجارب السريرية للوكيميا (إبيضاض الدم)، الورم الدبقي المتكيس (Cystic glioma) والورم الميلاني (Melanoma) جارية. والتطوير التجريبي لذلك هو العلاج بأسر البورون للنترونات (BNCT) باستخدام البورون-10 الذي يتركز في أورام الدماغ الخبيثة [10]. ثم يشعع المريض بالنترونات الحرارية التي تمتص بشدة بواسطة البورون، منتجة جسيمات ألفا عالية الطاقة، التي تقضي على السرطان. وهذا يتطلب جلب المريض إلى مفاعل نووي، بدلاً من أخذ النظائر المشعة إلى المريض. وتجهز غالبية المفاعلات البحثية الجديدة بترتيبات ضرورية للعلاج بأسر البورون للنترونات. لقد أصبح العلاج بالإشعاع ناجحاً بصورة متقدمة تدريجياً وهو يقوم بالعلاج بتأثيرات جانبية سمية بسيطة. وفي أي إجراء علاجي، يكون الهدف هو حصر الإشعاع بحجم الهدف المعرف جيداً للمريض. وتكون الجرعات لكل إجراء علاجي، نموذجياً، ما بين 20 ـ 60 غراي .

4.6 ـ إستخدام المفاعلات في التطبيقات الصناعية

1.4.6 ـ التصوير بالاشعة النترونية

إن أي مفاعل نووي مجهز بأنابيب حزمية، وقادر على التشغيل بقدرة أكبر من 1 كيلوواط، يمكن أن يكون صالحاً للتصوير بالأشعة النترونية. ولكن من الطبيعي أنه كلّما كانت القدرة أعلى كلّما زاد تدفق المصدر وكلّما كانت الطرق مناسبة والصورة الشعاعية أفضل. يتم توجيه حزمة النترونات إلى العينة عبر مجمع (Collimator) وعادة مرشح من البزموث (Bi-filter). يتم توصيف المجمعات وفقاً لنسبة (L/D)، حيث L هي المسافة ما بين المصدر والكاشف (Detector) و D هي عرض ثقب المصدر (الفتحة عند نهاية المصدر للمجمع). وكلّما كانت نسبة L/D كبيرة، كلّما يزيد الفصل الهندسي الإحتمالي (Potential Geometric Resolution) للنظام: صور الأشياء السميكة ستكون أكثر حدة بسبب التجميع المحسن. ومن ناحية أخرى، فإن التجميع المحسن يقلّل شدة النترونات المتاحة [10] .

إن التصوير بالأشعة النترونية بجودة عالية لجسم سماكته أكبر من 10 سم يحتاج إلى نسبة L/D أكبر من 200، والتي يمكن تحقيقها فقط بوجود مفاعل في

مدى الميغاواط. أما الجودة الأقل أو الصور الشعاعية لأشياء رقيقة فيمكن الحصول عليها في المفاعلات الصغيرة. ويقتصر التكييف (Tailoring) الهام لطاقة الحزم النترونية من أجل التصوير الشعاعي على مدى الميغاواط. ومع ذلك، فإن التصوير بالأشعة النترونية فوق الحرارية (حزمة مرشّحة بالكادميوم)، يمكن أن يتوافر في مدى الكيلوواط بزمن تشعيع يساوي بضع ساعات. وفي جميع الأحوال، فإن المزايا الرئيسية لاستخدام مفاعل صغير هي مستويات الإشعاع المنخفضة، المرونة، والتكلفة الأقل بكثير. برغم ذلك، قد تسبب المواد الإختبارية عالية التشعيع (الوقود) مشاكل في محيط جامعي .

2.4.6 ـ منشآت التطعيم التحولي للسليكون بالنترونات

السليكون هو المادة الأساسية لصناعة أشباه الموصلات، ويطعم بكميات ضئيلة من ذرات أخرى (مثل الفسفور) للتزود بمواصفات شبه الموصل. ويوفّر التطعيم التحولي بالنترونات (Neutron transmutation doping, NTD) الجودة الأعلى في انتظام التطعيم (للإلكترونيات الكهربائية على سبيل المثال). يبنى التطعيم التحولي بالنترونات على تحول السليكون-30 إلى الفسفور-31 بواسطة نترونات حرارية طبقاً للمعادلة التالية :

$$^{30}Si(n,\gamma)^{31}Si \longrightarrow {}^{31}P+\beta.\ {}^{30}Si$$

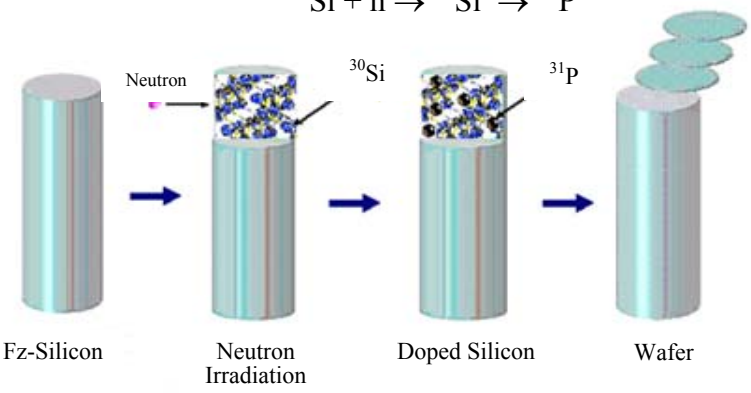
ولديها وفرة متساوية في الجهتين (Isotropic abundance) بنسبة 3.1% من السليكون الطبيعي .

إن لدى بلورة مفردة من السليكون غير المشعع مقاومة نوعية تساوي 1500 إلى 2000 أوم. سم. تقل هذه المقاومة أثناء تشعيع المفاعل حتى تصل إلى أقل من 1000 أوم. سم، والحدود الدنيا هي حوالي 5 أوم. سم. واعتماداً على الإستخدام المستقبلي للرقاقات (Chips) يحدد زمن التشعيع المقاومة النوعية المرغوبة نهائياً .

تسمح المنشآت النموذجية للتطعيم التحولي بالنترونات (NTD) بتشعيع بلورات يصل قطرها الخارجي إلى 150 مليمتراً وطولها حوالي 500 مليمتر. تدور البلورة أثناء التشعيع ويكون التدفق التكاملي للنترونات الحرارية (Integrated thermal neutron flux)، نموذجياً، يتراوح بين $10x1^{13}$

و$10x3^{13}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$. ثم تبرد البلّورات وتقطع إلى حلقات رفاقية (Wafers) يتم تنظيفها وتوصيفها وتشحن للإستخدام .

$$^{30}Si + n \rightarrow {}^{31}Si \rightarrow {}^{31}P$$



تقدر البلورات المفردة من السليكون التي يتم تطعيمها في المفاعلات البحثية على نطاق العالم بحوالي 150 طناً .

يتضمن الملحق (و) معلومات تفصيلية عن التطعيم التحولي للسليكون في مفاعل بحثي [14].

5.6 ـ إستخدام المفاعلات في البحوث الأكاديمية

يملك العديد من الجامعات مفاعلات بحثية لأغراض تدريسية وبحثية. ويتراوح مدى قدرتها ما بين جزء من الواط وعدة ميغاواط. إن تكاليف استثمار وتشغيل مفاعل بحثي عالية جداً، ولهذا فإن الإستخدام المستقبلي يجب أن يتم تقييمه ودراسته في مرحلة مبكرة من التخطيط. وعندها فقط يمكن تحديد النوع الأمثل من المفاعلات. وهكذا فإن السؤال المطروح أمام كل جامعة تخطط لشراء مفاعل هو التالي :

أي نوع من المفاعلات يلزمها ؟

للإجابة على هذا السؤال، لابد من معرفة كيف يستخدم المفاعل وما هي السمات والكفاءات التي يتمتع بها المفاعل والتي يمكنها دعم مشاريع بحثية بعينها.

إن الجامعات التي تقدم مقررات تعليمية نظرية وعملية في مجال الهندسة النووية بمستوى متقدم تحتاج إلى مفاعل بحثي لأغراض تعليمية وتدريبية. ومن المهم جداً أن تقدم هذه المنشأة مدى واسعاً من الإمكانات التجريبية وأن يكون تشغيلها بسيطاً ومعقول التكلفة. إن مستوى القدرة النموذجية لتلك المنشاة قد يتراوح بين 100 إلى 250 كيلوواط. وإذا لم تتبع الدولة أي برنامج للقدرة النووية في المستقبل، فإن هذا هو مستوى القدرة المثالي للبحث الأكاديمي والتدريب والتعليم وكذلك للتطبيقات الصناعية بمقياس صغير. وإذا رغبت الدولة أيضاً في استخدام تلك المنشأة بالمستقبل من أجل تطوير برنامج وطني للقدرة النووية وإنتاج نظائر طبية ولتطبيقات صناعية أضخم، فإن مستوى قدرة المفاعل لا بد أن يكون أكثر من 1 ميغاواط بلا أدنى شك، إحتمالياً في المدى من 3 إلى 10 ميغاواط. أما إذا لم يكن مستقبل التطور النووي للدولة واضحاً في الوقت الحاضر، لكن البحث النووي على وشك البدء الآن، فإن أحد الخيارات يتمثل في مفاعل يتمتع بإمكانية زيادة مستوى قدرته في المستقبل. في هذه الحالة، لا بد من التخطيط لإجراءات وقائية من أجل التدريع (Shielding) المناسب، سعة التبريد، زيادة الوقود ... إلخ، من أجل تسهيل زيادة القدرة في المستقبل وتقليص التكاليف. لقد أظهرت الخبرة السابقة أنه بتخطيط مسبق حذر واستثمار قليل يمكن زيادة القدرة بعامل يساوي 10 .

1.5.6 ـ التدريس

في الجامعات التي تتضمن برنامجاً هندسياً نووياً، يمكن استخدام مفاعل لتكملة مقررات التعليم النظرية بممارسات عملية. ويمكن أن تكون المقررات النموذجية هي :

أ ـ القياسات الإشعاعية
ب ـ تقنيات النظائر المشعة
ج ـ نظرية المفاعل
د ـ ديناميكية المفاعل .

وهناك بعض المقررات الأخرى التي لا تحتاج إلى توافر مفاعل، مثل تصميم المفاعل، الهيدروليكا الحرارية (Thermohydraulics) للمفاعل ونظرية الأمان .

يتضمن الملحق (ز) موجزاً عن مقررات التعليم التدريبية التي يجب أخذها في الإعتبار بالخصوص .

2.5.6 ـ البحث

إن البحث في ميدان إنشاء المفاعل، الهيدروليكا الحرارية للمفاعل وأمان المفاعل باستعمال مفاعل تدفق عالي يكون ممكناً فقط في مراكز البحث الكبرى، وليس ممكناً في الجامعات. ومع ذلك، لا يزال هناك ثلاثة ميادين للبحث ذات أهمية متزايدة، وهي :

أ ـ التحليل بالتنشيط

ب ـ الإختبارات اللاّإتلافية بالنترونات

ج ـ إنتاج النظائر المشعة قصيرة العمر

ويمكن عملياً خدمة جميع مجالات العلوم الطبيعية والتكنولوجيا، وخاصة الطب والبيولوجيا والكيمياء والجيولوجيا وعلم الفلزات بواسطة تلك الإجراءات .

1.2.5.6 ـ التحليل بالتنشيط

يعد التحليل بالتنشيط إجراء لكشف وقياس كميات صغيرة جداً من عينة ما. وتتزايد ميادين التطبيق بصورة سريعة. يتم فحص العينات عن طريق تشعيعها لفترات قصيرة في مفاعل ـ لدقائق أو ثواني ـ ثم يتم القياس [3]. وبهذه الطريقة، يتحول بعض المادة إلى نظائر مشعة. وبعد إزالة العينات من المفاعل يتم فحصها، بالنظر إلى طاقتها الإشعاعية، شدتها وثوابت الإضمحلال في ظروف معينة. ويمكن من هذه النتائج، بنظام تحليل محوسب، تحديد تركيب العينة كمياً .

متطلّبات المفاعل

التدفق النتروني : $10x1^{11}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$

الأجهزة الضرورية

جهاز تحليل متعدد القنوات وعالي الجودة مع كواشف أشباه الموصلات وحاسوب ذو برمجيات معينة. نظام لتحضير العينة ونقلها .

2.2.5.6 ـ الإختبارات اللاّإتلافية بالنترونات

أنظر 2.1.6 .

3.2.5.6 ـ إنتاج النظائر المشعة

تعد النظائر المشعـة أداة قوية في البحث. ويمكن للمفاعلات البحثية إنتاج النظائر ذات عمر النصف القصير الأقل من بضعة أيام، والتي يتعذّر الحصول عليها تجارياً. وهي تستخدم لبحوث إقتفاء الأثر بالجامعات ومختبرات المستشفيات.

3.5.6 ـ ملاحظات على أنواع المفاعلات بالجامعات

يقوم مزودون مختلفون بتقديم عدد من المفاعلات البحثية المختلفة. وإذا كان المفاعل سيستخدم في تدريب طلبة الهندسة النووية، فيجب عليهم أن يكونوا قادرين على تشغيل المفاعل كل بمفرده تحت إشراف للحصول على شعور بالتصرف الوقتي مع مفاعل معين. ويجب على المفاعل أن يكون آمناً ضمنياً، بمعامل حرارة سلبي كبير وتفاعلية زائدة قليلة ونظام إيقاف آمن في حالة القدرة الفائضة. ويمكن مواجهة مسألة القدرة كما يلي : للتدريب يكفي بضع وحدات من الواط فقط، للبحث في التطبيقات المعطاة أعلاه تتراوح القدرة ما بين 5 إلى 30 كيلوواط، لمدى واسع من الإستخدامات متعددة الأغراض تكون القدرة من 100 كيلوواط إلى 1 ميغاواط، وللتطبيقات التجارية تفوق القدرة 5 ميغاواط. ويجب أن يكون حاضراً في الأذهان دائماً أن تكاليف هيئة التشغيل والتأمين وخصوصاً الوقود وتصريف النفايات تزيد بازدياد قدرة المفاعل .

6.6 ـ إستخدام المفاعلات لأغراض التدريب

يعد التدريب أحد الإستخدامات الهامة للمفاعلات البحثية ذات القدرة المنخفضة عموماً، ونادراً ما يتم اختيار المفاعل (القدرة، نوع التصميم، الوقود، إلخ) لتطبيق منفرد (فيزياء، إنتاج نظائر المشعة، تدريب، إلخ)، ولكن تبين من الممارسة العملية أن جميع مفاعلات البحوث منخفضة القدرة التي في حالة تشغيل تستخدم لأغراض التدريب، على الأقل جزئياً .

إن هذا الاهتمام بالأنشطة التدريبية يتعلق بالدول التي لديها برامج نووية وطنية كبرى وكذلك هؤلاء الذين على وشك البدء في برنامج نووي وطني .

وهناك أنواع عديدة ممكنة من التدريب، اعتماداً على نوع المتدربين (طلبة، فيزيائيين، مستخدمين قائمين على التشغيل، إلخ)، على درجة المعلومات المطلوب نقلها (نظرية وعملية)، على طول فترات الدورات التدريبية (من بضعة أيام إلى عدة شهور)، وطبعاً على مواصفات المفاعلات وإمكاناتها مثل القدرة والتركيبات وتنظيمات الأمان وسهولة الدخول إليها .

1.6.6 ـ السمات المطلوبة في المفاعلات لأغراض التدريب

فيما يلي نعرض السمات المطلوبة في المفاعلات النووية لأغراض التدريب :

أ ـ درجة عالية من الأمان : بالطبع يعد الأمان متطلباً مهيمناً في أجهزة التدريب، وخصوصاً في المفاعلات البحثية .

ب ـ سهولة التشغيل : يجب أن تكون مفاعلات التدريب مصممة بحيث يفرض أقل عدد من التقييدات على الطلبة والمعلمين (مثلاً يمكن تشغيل الخزانة التي تحتوي على لوحة مفاتيح التحكم بأمان من قبل طلبة ليس لديهم خبرة بعد فترة قصيرة فقط من التعليم) .

ج ـ سهولة الصيانة : يجب أن تكون الأجهزة مرتبة بحيث يسهل الدخول لصيانتها، كما يجب أن يتم اختيار المكونات لمدى الحياة ولصيانة أقل ما يمكن .

د ـ سهولة التجارب للطلبة والمعلمين : بالنسبة لمفاعلات التدريب، يعد أمراً مرغوباً فيه للغاية سهولة إجراء الطلاب لتشكيلة واسعة من التجارب البحثية والتدريبية .

2.6.6 ـ البرامج التدريبية

من الصعب إعطاء ملخص للبرامج التدريبية المنفذة في مفاعلات بحثية ذات طاقة منخفضة دون أن نأخذ في الحسبان المتدربين المشاركين (طلبة، فيزيائيين، مستخدمين للتشغيل، إلخ) ودون الإشارة إلى الإمكانات والحدود التي يقدمها كل نوع من أنواع المفاعلات (قدرة، سهولة دخول، مرونة، إلخ) .

يتضمن الملحق (ح) موجزاً للبرامج التدريبية في هذا الخصوص .

3.6.6 ـ المحاكيات

إن استخدام محاكيات المفاعل يتكرر بصورة متزايدة. وهذا الجهاز مرن، قابل للتكيف، سهل التنفيذ، ذو تكلفة قليلة نسبياً ويقدم الوسائل، المقدرة بشكل كبير في مجال القدرة النووية، لتدريب طلبة الهندسة النووية وكذلك مستخدمي منشآت القدرة. هناك كمية ضخمة من الأدبيات المنشورة في هذا المجال والتي تتعامل مع الأنواع المختلفة من المحاكيات ومهماتها الرئيسية (محاكيات أصلية أساسية، تمثيل مدى كامل، حادث، محاكيات وظيفية، إلخ) .

4.6.6 ـ التدريس بمساعدة الحاسوب

يعد هذا موضوعاً أكثر عمومية بعد أن أصبح التدريس بالإستعانة بالحاسوب هاماً بصورة متزايدة في جميع الميادين. وعلى ذلك، فإنه في المجال النووي تكون مساعدة الحاسوب هامة جداً، حيث أنه يفسر العديد من العلاقات الارتباطية المتبادلة فيما بين المفاعل، الحرارة، التفاعلية، الهيدروليكا الحرارية، إلخ. وهناك عدد من البرامج التعليمية البسيطة في السوق .

7 ـ ملاحظات ختامية

تبنى المفاعلات البحثية ويتم تشغيلها من أجل تطوير القدرة البشرية في ميدان التقانات النووية التطبيقية وكذلك للتطبيقات المباشرة في العلوم والتقانة. وهي تشكّل خطوة لازمة لأية دولة تود الشروع في برنامج للقدرة النووية. وحيث أنه لا توجد نماذج ثابتة للمفاعلات البحثية، فإن التكلفة يمكن أن تتباين، حسب المرافق المصاحبة، التي تبنى لتعظيم الإستفادة من المفاعل إلى أقصى حد. وحالياً، يمكن أن تصل التكلفة المبدئية لمفاعل بحثي قدرته 20 ميغاواط، مزود بالخلايا الساخنة الأساسية ومتطلبات التشعيع وعدد معقول من المرافق الخدمية، إلى 100 مليون دولار أمريكي. وقد يستغرق بناء مفاعل بحثي حوالي خمس سنوات. هذا الإطار الزمني لا يشمل المزايدات والتعاقدات وأية تأخيرات بسبب نقص التمويل أو البيروقراطية .

8 ـ المراجع

[1] Nuclear Research Reactors in the World, IAEA Reference Series No. 3, Edition 2000.

[2] Research Reactors, UIC Nuclear Issues Briefing, paper #66, May 2007.

[3] H. Böck and M. Villa, Survey of Research Reactors, ENEN, Wigner Course, 2004.

[4] SLOWPOKE Reactor Facility, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.
http://www.chem-eng.utoronto.ca/~slopoke/

[5] Syrian Arab Republic, SRR-1
http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/

[6] KSU TRIGA MK II
http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/

[7] TRIGA – 45 Years of Success
http://triga.ga.com/45years.html

[8] ETRR2, Egypt.
http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/

[9] Maple Research Reactor.
http://en.wikipedia.org/wiki/MAPLE

[10] The HFR Reactor at Petten.
http://ie.jrc.cec.eu.int/publications/brochures/HFR%20brochure.pdf

[11] The HFIR Reactor at ORNL.

[12] The OPAL Australian Reactor.
http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/

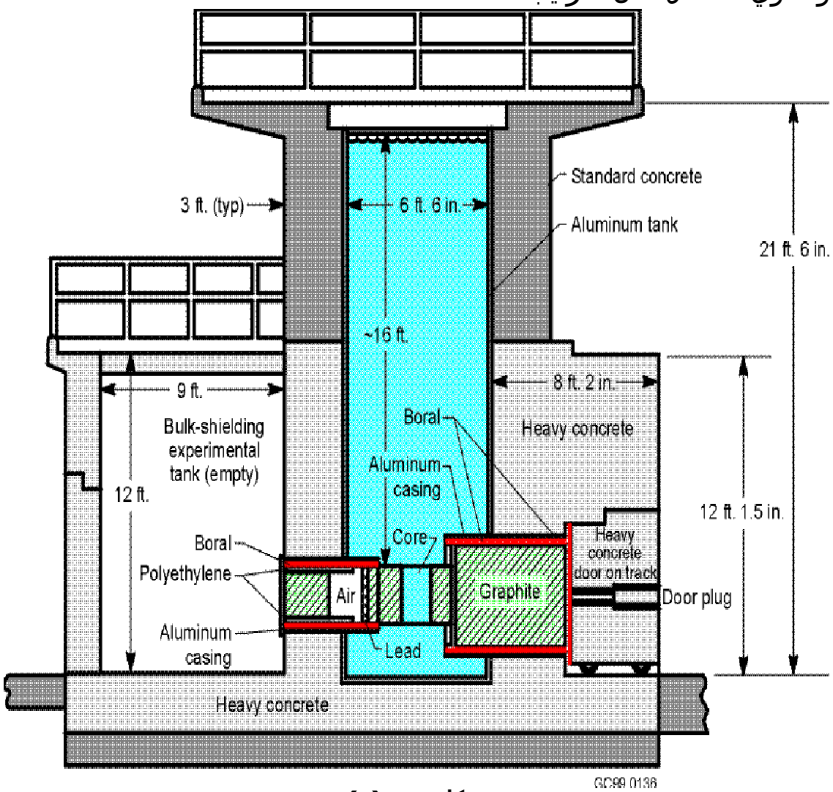
[13] Uses of Research Reactors.
http://www -naweb.iaea.org/napc/physics/ACTIVITIES/rr.htm

[14] NTD Silicon for Power Electronics, TOP SILCON
http://www.topsil.com/1 .

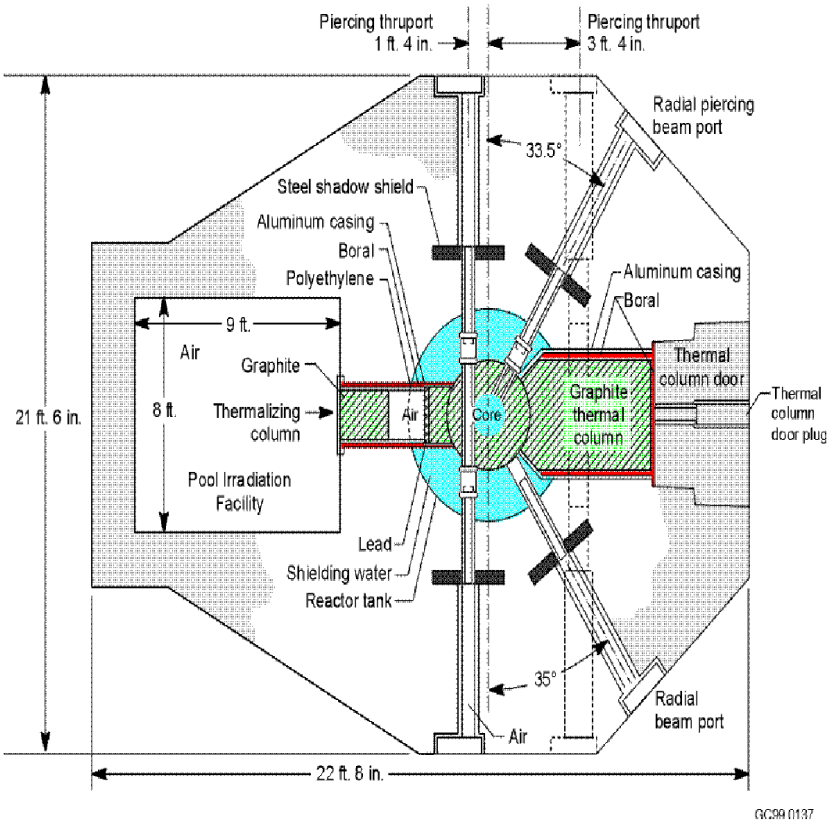
ملحق (أ)

مفاعلات TRIGA

مفاعل TRIGA من نوع المفاعل ذي الحوض الذي يمكن تركيبه دون إنشاءات تحتويه، وهو مصمم للإستخدام من قبل المؤسسات العلمية والجامعات لأغراض مثل تعليم الخريجين، البحث التجاري الخاص، الاختبارات اللاّإتلافية وإنتاج النظائر. وهو مفاعل نموذجي تبلغ قدرته 250 كيلوواط (TRIGA Mark II) من مفاعلات الماء الخفيف (LWRs) بعاكس غرافيتي حلقي مبرد بالحمل الحراري الطبيعي. ويظهر في الشكلين رقمي (1) و(2) المشهدان الجانبي والعلوي للمفاعل على الترتيب .



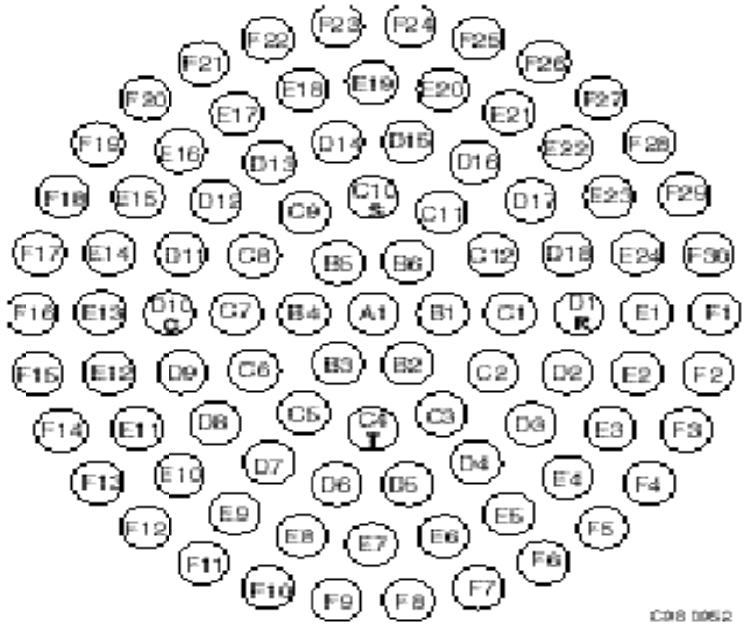
شكل رقم (1)
مشهد جانبي لمفاعل TRIGA



شكل رقم (2)
مشهد علوي لمفاعل TRIGA

يوضع قلب المفاعل في قاع صهريج مفتوح يبلغ ارتفاعه 6.25 متراً وقطره مترين، وللقلب تشكيل أسطواني (شكل 3). في المجمل هناك 91 موقعاً في القلب، يمكن حشوها إما بعناصر الوقود أو بأي مكونات أخرى مثل قضبان التحكم، مصدر نترونات، قنوات تشعيع، إلخ. ولدى شبكة القلب (Core lattice) بنية أسطوانية، لكنها ليست دورية. ويتم ترتيب العناصر في ست حلقات متمركزة: A، B، C، D، E و F بـ 1، 6، 12، 18، 24 و30 موقعاً على التوالي. كل موقع يقابل ثقباً في الصفيحة الشبكية العليا للمفاعل والمصنوعة من الألومنيوم. وتكون المسافات بين المواقع في الحلقة الواحدة متساوية. أما المسافات بين مركز

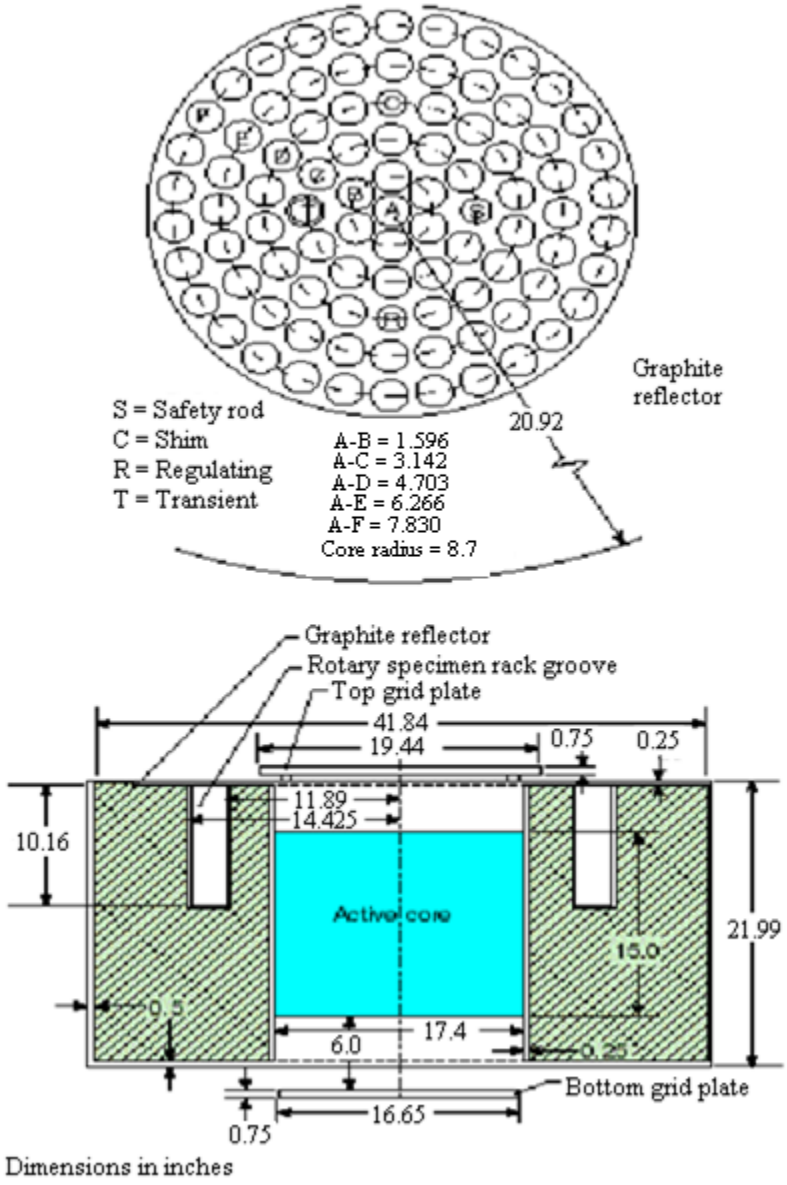
قاب المفاعل والحلقات فهي معطاة في الشكل رقم (4). لاحظ أن الحلقة تمر خلال مركز عناصر الوقود لتلك الحلقة .



شكل رقم (3)

تشكيل قاب المفاعل مع مواقع القضبان المرقمة

الموقع A1 يتم حشوه عادة بأنبوب تشعيع فارغ مصنوع من الألومنيوم. عناصر الوقود في المواقع D8، E10، E11، وD17، E22، E23 يمكن إزالتها في مجموعات ثلاثية. وبالقطع على شكل مثلث في الشبكة العليا عند هذه المواقع يمكن حشر أنابيب تشعيع رأسية كبيرة (مثلثة الشكل تقريباً بأبعاد عناصر الوقود الثلاثة). أثناء التشغيل بالنمط النبضي (Pulse mode)، تزال تلك القنوات لمنع وصول القدرة الموضعية إلى الذروة. ويدعم قاب المفاعل بصفيحة شبكية سفلى، والتي تزود أيضاً تباعداً دقيقاً بين عناصر الوقود. كما تزود الصفيحة الشبكية العليا أوضاعاً جانبية لعناصر قاب المفاعل. وكل من الصفيحتين مصنوعة من الألومنيوم بنفس السماكة (0.75 بوصة)، ولكن بأقطار مختلفة (شكل 4) .



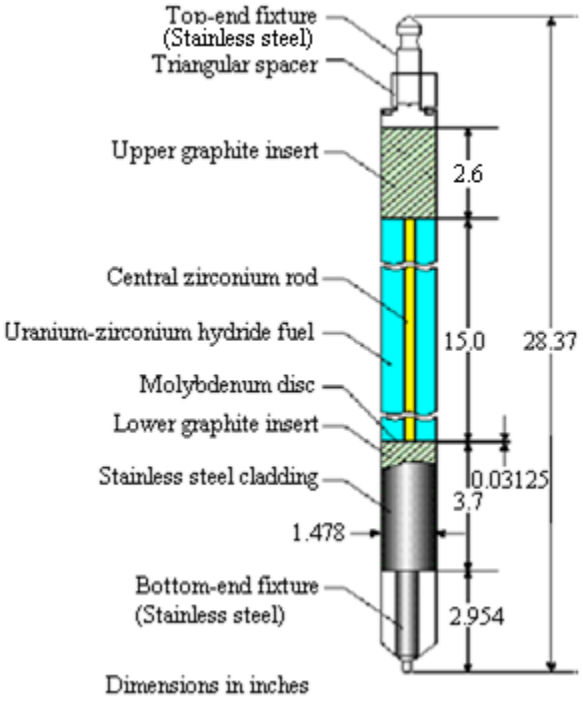
شكل رقم (4)

مشهدان تخطيطيان علوي وجانبي لقلب المفاعل وعاكس الغرافيت

إن عاكس الغرافيت المحصور في غـلاف خارجي من الألومنيوم يحيط بقلب المفاعـل. ويجهز الأخدود الحلقي (Annular groove) الذي يبلـغ عرضـه 2.5 بوصة في الجزء الأعلى من جسم العاكس ليحتوي وسيلة تشعيع خاصة (رف عينة دوار). وهو مصنوع من الألومنيوم ويتألـف من 40 ثقبـاً بقطر داخلي يساوي 38 مليمتراً. وفي الشكل رقم (4) تم بيان أبعاد العاكس والغلاف وأخدود رف العينة الدوار. هناك قناتا تشعيع أفقيتان تمران خلال عاكس الغرافيت : قناة التشعيع نصف القطريـة التي تتوقـف عند نصف قطر العاكس وتوضع على بعد 2.75 بوصة أسفل وسط السطح الأفقـي، كما توضع قناة التشعيع المماسية على بعد 2.75 بوصة أسفل وسط السطح الأفقي وتمر بقلب المفاعل على بعد 12.77 بوصة من المركز. ويمكن رؤية المواضع نصف القطرية للقنوات في الشكل رقم (2). ويتم ملء قناتي التشعيع كليهما بالهواء وتغلّفان بالألومنيوم. وتمتد القنوات الأفقية الأخرى فقط إلى الحافة الخارجية للمفاعل .

عناصر الوقود (Fuel elements)

عنصـر الوقـود هو قضيب أسطواني مغلّف بالصلب الذي لا يصدأ (304 ـ SS) يبلغ طوله الكلي 28 بوصة تقريباً بقطر 1.5 بوصة. ومادة الوقود في كل عنصر يبلغ طولها 15 بوصة. وهناك كبسولات الوقود الغرافيتية الأسطوانية بطول 2.6 بوصة و 3.7 بوصة عند النهايات العلوية والسفلية على التوالي، والتي تعمل كعاكسات محورية (Axial reflectors). في مركز مادة الوقود ثقب قطره 0.25 بوصة يتم حشوه بقضيب من الزركونيوم. وبين حشوة عنصر الوقود وعاكس النهاية السفلية الغرافيتي يوجد قرص من الموليبدنوم سماكته 1/32 بوصة. ويكون الوقود خليطاً متجانساً من اليورانيوم وهيدريد الزركونيوم. في تلك التجارب، يستخدم فقط نوع واحد من عناصر الوقود وهي عناصر الوقود العيارية المغلفة بالصلب الذي لا يصدأ بمحتوى يورانيوم 12% من حيث الوزن وبنسبة تخصيب 20% (يورانيوم فيه 20% وزناً U^{235}). ويبين الشكل رقم (5) هندسة عنصر الوقود .



شكل رقم (5)

عنصـــر وقـــود

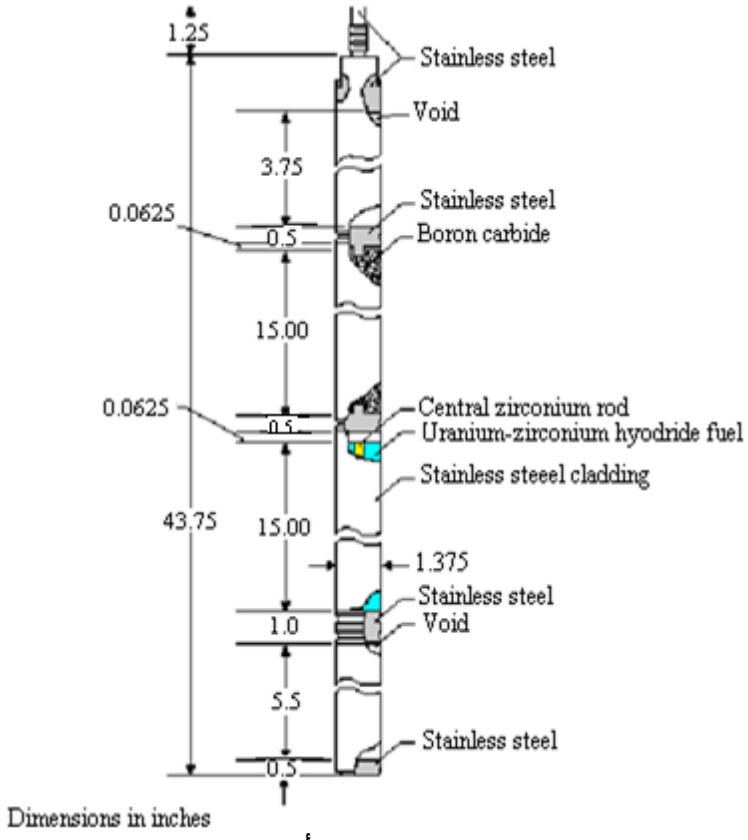
قضبان التحكم (Control rods)

تستخدم ثلاثة قضبان تحكم من نوع (Fuelled follower) في المفاعل : للتنظيم (R) والضبط (C) والأمان (S). ويشار إلى مواضعها في الشكل رقم (4). وهي متطابقة في هندستها وتركيبها (أنظر الشكل رقم 6.أ). وعندما تكون قضبان التحكم في وضعها الأعلى تماماً تكون مؤشرات وضعها مضبوطة لتشير إلى 200 خطوة، وتشير إلى 900 خطوة عند وضعها السفلي تماماً .

القضيب العابر (Transient rod)

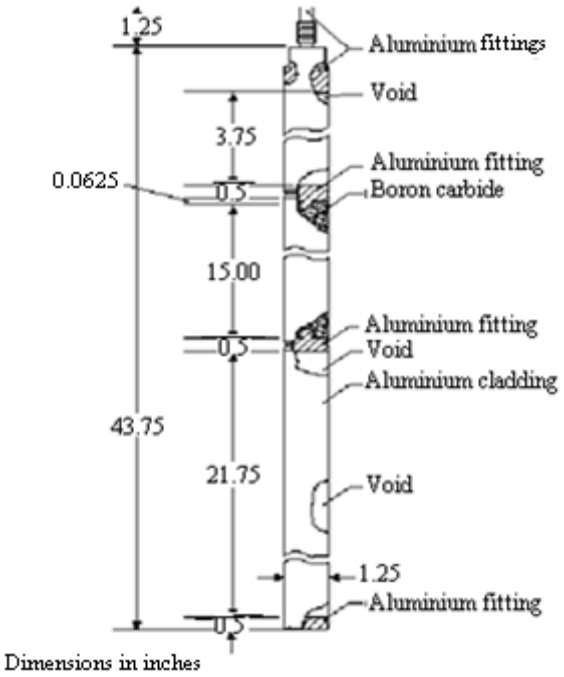
بالتشابه مع قضبان التحكم من نوع (Fuelled follower)، فإن القضيب العابر (T في الشكل رقم 4) يتألف من الجزء الماص وما يطلق عليه تابع الهواء

(Air follower)، الذي يحلّ محل جزء الوقود في قضبان التحكم من نوع (Fuelled follower)، أنظر الشكل رقم (6. ب). إن الغرض من تابع الهـواء، الذي هو في الحقيقة أنبوب فارغ، هو لتقليل زيادة القدرة إلى الذروة التي قد تظهر عندما يكون القضيب العابر في وضعه المسحوب تمامـاً. وللقضيب العابر أنبوب موجه (Guide tube) وهو المكون البنيوي الوحيد في المفاعل الذي يمتد داخل الحجم الفعـال لقلب المفاعل. وتكون الأبعاد الرأسية للقضيب العابر مماثلة تقريباً لأبعاد قضبان التحكم التي تظهر في الشكل رقم (6. أ) .



شكل رقم (6. أ)

قضيب تحكم من نوع (Fuelled Follower)



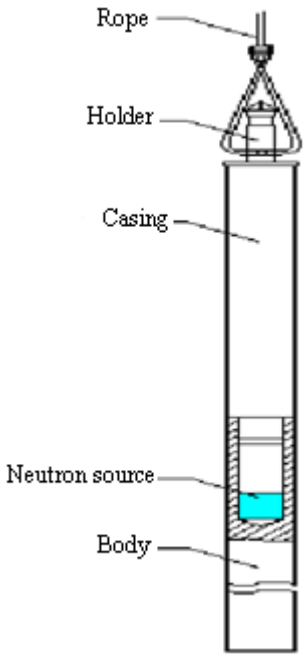
شكل رقم (6. ب)

قضيب عابر

يجهز القضيب العابر بنظام هواء مضغوط (Pneumatic system) للسحب السريع. وعندما يكون صمام الهواء المضغوط مفتوحاً بواسطة ضغط إشارة "إشعل" يدفع ضغط الهواء القضيب من موضعه المحشور تماماً إلى موضعه النهائي المضبوط مسبقاً بما يعرف بآلية قيادة القضيب العابر. وعندما يكون القضيب العابر في موضعه الأعلى تماماً فإن مؤشر وضعه يكون مضبوطاً ليشير إلى 0 خطوة، ويشير إلى 900 خطوة عند وضعه المحشور تماماً .

منبع النترونات (Neutron source)

يحتوي عنصر المنبع النتروني (شكل رقم 7) على منبع نتروني (بريليوم ـ راديوم) بنشاط 10^6 نترون/ثانية. وتكون الأبعاد الخارجية لعنصر المنبع مماثلة لعنصر الوقود .



شكل رقم (7)

منبع نتروني

تشكيل قلب المفاعل (Core configuration)

يضبط تشكيل قلب المفاعل على التشغيل النبضي. وهو يحتوي على 52 عنصر وقود في ترتيب مدمج (لا توجد قنوات تشعيع داخل القلب إلاّ القناة المركزية، بدون مواضع فارغة، الشكل دائري تقريباً). وتكلف التفاعلية الزائدة $3 تقريباً وتتجاوز قليلاً قيمة القضيب العابر. ويبلغ هامش الإيقاف (Shutdown margin) $7 تقريباً، وتكلّف التفاعلية النبضية القصوى المسموح بها $2.5 .

يستخدم مفاعل TRIGA وقود اليورانيوم ـ هيدريد الزركونيوم (UZrH)، والذي لديه معامل حرارة سلبي فوري (Prompt negative temperature coefficient)، مما يعني أنه حينما تزداد حرارة قلب المفاعل، تقل التفاعلية ـ لذلك من المستحيل فيزيائياً حدوث إنصهار إنهياري في المفاعل.

وقد تم تصميم مفاعل TRIGA أصلاً ليزود بوقود عالي التخصيب، برغم أنه في عام 1978 أطلقت وزارة الطاقة الأمريكية برنامجها "تخصيب منخفض للمفاعلات البحثية والإختبارية"، الذي شجع تحويل المفاعل إلى وقود اليورانيوم منخفض التخصيب. لقد أتم برنامج المفاعل النووي لمؤسسة (General Atomics, GA) والمعروف باسم TRIGA 45 عاماً من النجاح في تصميم وتشغيل مفاعلاته. وتم تركيب مفاعل TRIGA، المفاعل البحثي الأوسع استخداماً في العالم، في مايزيد على 65 منشأة في 24 دولة في 5 قارات. وحالياً تستمر مؤسسة GA، المزود الباقي الوحيد للمفاعلات البحثية في الولايات المتحدة، في تصميم وتركيب مفاعلات TRIGA حول العالم، وقامت ببناء مفاعلات TRIGA بتشكيلات وقدرات متباينة وبمستويات قدرة مستقرة تتراوح من 20 كيلوواط إلى 16 ميغاواط. ويعد مفاعل TRIGA هو المفاعل النووي الوحيد ضمن هذه الفئة الذي يقدم "أماناً متأصلاً" حقيقياً، بدلاً من الإعتماد على "الأمان الهندسي" (Engineered safety). ويعد وقود اليورانيوم ـ هيدريد الزركونيوم (UZrH) منخفض التخصيب وطويل العمر هو السمة الأساسية في عائلة TRIGA من المفاعلات، والذي يبرر أداءها الصارم المعول عليه وأمانها المعروف بصورة واسعة واقتصادها في التشغيل وقبولها عالمياً. إن معامل الحرارة السلبي الفوري الكبير ضمن خصائص التفاعلية لوقود UZrH يؤدي إلى هوامش أمان أعلى بكثير من تلك التي تم بلوغها باستخدام أي وقود مفاعل بحثي آخر. وتكون إدخالات التفاعلية الكبيرة (Large reactivity insertions) مكيفة بسهولة وتعد عمليات تشغيلية روتينية لبعض التطبيقات. وقد تمت البرهنة على أن إدخالات التفاعلية غير المقصودة لا ينتج عنها ضرر للوقود في قلوب مفاعلات TRIGA.

إن هبوط القدرة (Power coast-down) من القدرة الكاملة بعد فقدان تبريد التدفق القسري (والإيقاف الفجائي الناتج) قد برهن على كونه حدثاً غير خطير، مع المفاعل المتاح عودته فورياً إلى القدرة الكاملة. وينتج عمر قلب المفاعل الطويل بوقود TRIGA من حقيقة أن كمية كبيرة من اليورانيوم يمكنها التكيف بسهولة في مصفوفة الوقود (Fuel matrix)، شاغلة نسبة مئوية صغيرة نسبياً من حجم الخليط. وتنتج توفيرات ضخمة في تكلفة التشغيل وكذلك توفيرات في التكلفة الكلية لدورة الوقود، بسبب الأعمار الأطول لقلوب المفاعلات، والتي

هي نتيجة التحميل الأعلى لليورانيوم في وقود TRIGA بالمقارنة مع أنواع الوقود المنافسة. إن دورات الوقود الطويلة لوقود اليورانيوم ـ هيدريد الزركونيوم (UZrH)، والتي تؤدي إلى المرونة التشغيلية الممكنة الأعلى للنظام في فترات الإيقاف لهذا المفاعل، يمكن تعيينها دائماً بواسطة متطلبات المستخدم بدلاً من متطلبات دورة الوقود .

كذلك فإن لمادة UZrH قدرات فائقة للإحتفاظ بنواتج الإنشطار أكبر بكثير من أنواع وقود المفاعلات البحثية المنافسة. ينصهر الوقود من نوع الصفيحة المغلف بالألومنيوم عند حوالي 650°م، مطلقاً نواتج إنشطار متطايرة بنسبة 100% بصورة جوهرية. وعند هذه الحرارة، يحتفظ UZrH بحوالي 99.9% من نواتج الإنشطار تلك. وتتضمن خيارات تصميم الوقود وقوداً منخفض الكثافة من اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU) يحتوي على 8.5% وزناً من اليورانيوم، إلى الوقود عالي الكثافة الذي يحتوي على 45% وزناً من اليورانيوم بسموم قابلة للإحتراق. وتزود عناصر وقود منفردة بقطر 38 ملليمتراً للإستخدام في تشكيلات قلب المفاعل TRIGA Mark I & Mark II. ويستخدم الوقود بقطر أصغر في التشكيلات العنقودية للوقود (Fuel cluster configurations) من أربعة أو ستة عشر أو خمسة وعشرين قضيب وقود من أجل تحويل المفاعلات الموجودة إلى شبكات قلب TRIGA وتطبيقات قدرة أعلى. لقد تم تأهيل وقود TRIGA بصورة كاملة بواسطة اختبارات شاملة ضمن برنامج وزارة الطاقة الأمريكية "تخصيب منخفض للمفاعلات البحثية والإختبارية" (RERTR). وتتضمن الميزات المثبتة لوقود TRIGA عن الوقود الآخر المستخدم في المفاعلات البحثية والإختبارية ما يلي :

1 ـ مبدأ النترون الدافئ (Warm neutron) المستخدم في وقود UZrH يعطي المفاعل "معامل حرارة سلبي فوري للتفاعلية" مقابل معامل متأخر للأنواع الأخرى من المفاعلات البحثية التي تستخدم وقوداً من نوع الصفيحة المغلفة بالألومنيوم. وهذا يسمح لمفاعلات TRIGA بالصمود أمام الأحداث بأمان، والتي قد تدمر تماماً قلوب المفاعلات المزودة بوقود الصفيحة .

2 ـ اليورانيوم ـ هيدريد الزركونيوم (UZrH) مستقر كيميائياً، ويمكن إخماده بأمان عند 1200°م في الماء. بينما تحدث تفاعلات إتلافية ناشرة للحرارة وغير آمنة بين المعدن والماء في حالة الألومنيوم المغلف للوقود من نوع الصفيحة عند 650°م .

3 ـ مقاومة الحرارة العالية وقابلية السحب والتطريق (Ductility) لتغليف الوقود بالصلب الذي لا يصدأ أو بالسبيكة 800 (Alloy 800) تضمنان كمالاً تغليفياً كلياً عند درجات حرارة عالية تصل إلى 950°م، في حين ينصهر الألومنيوم المغلّف لوقود من نوع الصفيحة ويخفق عند حوالي 650°م .

4 ـ مادة وقود UZrH لديها قدرة احتفاظ فائقة للغاية بنواتج الانشطار المشعة مقارنة بالوقود من نوع الصفيحة المغلف بالألومنيوم. ذلك الوقود من نوع الصفيحة ينصهر عند 650°م، مطلقاً جميع مخزون النواتج المشعة المتطايرة تقريباً في الوقود. وعند نفس درجة الحرارة، يحتفظ UZrH بأكثر من 99% من نواتج الانشطار تلك، حتى لو كان كل التغليف سيزال .

وقود TRIGA هو مصفوفة $UZrH_{1.7}$ تسمح بانتقاليات سريعة في تشغيل القدرة دون تأثيرات سيئة. وبمصطلحات مبسطة، عندما تزيد درجة حرارة الوقود، تدخل ذرات الهيدروجين في حالة اهتزاز (Vibration state) بمستوى طاقة 0.13 إلكترون فولط، وقد تدخل في حالة ثانية بمستوى طاقة 0.26 إلكترون فولط. علماً بأن النترونات الحرارية تكون عند طاقة 0.25 إلكترون فولط. هذه الحالات الإهتزازية تخفض بصورة فعالة حرارة النترونات في المفاعل (تقسية طيف النترونات) وتوقف المفاعل أثناء انتقالية سريعة في القدرة. وبعدها تغادر النترونات ذات الطاقة الأعلى على الأرجح إلى خارج الوقود، وهكذا تزداد احتمالية الامتصاص في المادة المهدئة وقضبان التحكم .

ملحق (ب)

السمات الأساسية لمفاعل ETRR2

ETRR-2 هو مفاعـل بحثي متعدد الأغـراض (Multipurpose Research Reactor)، قامت بتصميمه وبنائه الشركة الأرجنتينية INVAP في إنشاص قرب مدينة القاهرة بمصر. وهو من نوع المفاعل الغاطس في حوض مفتوح (Open pool reactor type)، بقدرة إسمية 22 ميغاواط وبتدفق نتروني حراري أقصى يبلغ $10x2.7^{14}$ نترون.سم$^{-2}$ ثانية$^{-1}$ (مصيدة نترونات). ويتبع توزيع قلب المفاعل والأنظمة المصاحبة للتحكم والأمان معايير التصميم التالية :

1 ـ تدفق التبريد نحو الأعلى

2 ـ دخول حر لطاقم مستخدمي المفاعل إلى أعلى الحوض أثناء تشغيل المفاعل بقدرته الكاملة

3 ـ دخول سهل إلى قلب المفاعل من أعلى الحوض

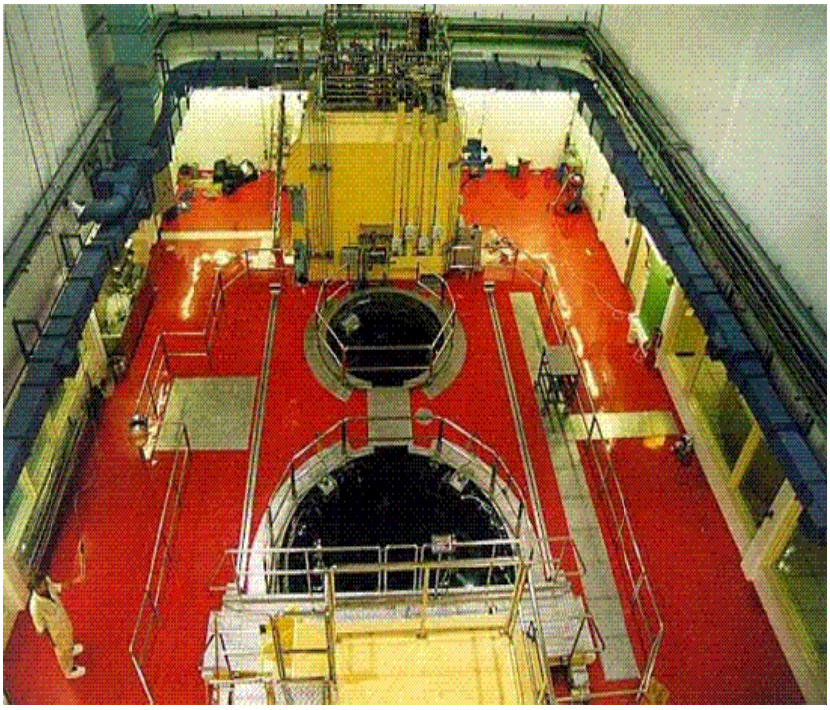
4 ـ وسائـل إدارة قضبان التحكم والأمـان توضع تحت صهريج المفاعل

5 ـ نظام إيقاف المفاعل يتكون من نظامين مستقلين ومختلفين : نظام صفائح أمان وضبط المفاعل ونظام حقن الغادولينيوم (Gd)

6 ـ تبريد قلب المفاعل أثناء عملية الإيقاف يتم بواسطة الدوران الطبيعي لماء الحوض خلال القلب

7 ـ نظام حقن الماء للحماية من عواقب حادث فقدان المبرد (Loss of coolant accident, LOCA) .

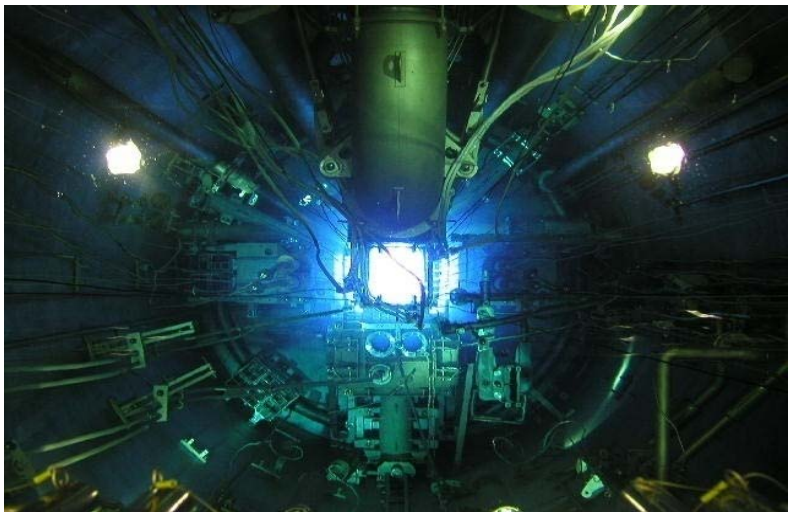
المفاعـل مخصص لإنتاج النظائر المشعـة من أجـل التطبيقات الصناعية والطبية، بحوث فيزياء النترونات، وتدريب المستخدمين. ويميز المفاعـل أنابيـب عديـدة لحـزم التشعيـع، خلايـا ساخنة وأجهزة بحثية أخرى .



المفاعل المصري البحثي الثاني ETRR2

حوض المفاعل أسطواني الشكل يبلغ قطره 4.5 أمتار وهو مبني من الصلب الذي لا يصدأ. ويتصل به حوض إضافي لتخزين الوقود والتعامل مع المواد المشعة. ويتشكل قلب المفاعل في شبكة 6x5 محاطة بمدخنة (Chimney) من سبيكة الزركونيوم (Zircaloy) على بعد 10 أمتار أسفل سطح الحوض. ويتم الإحتفاظ بطبقة من الماء الحراري في أعلى الحوض للحماية من إطلاق نواتج مشعة غازية إلى المستخدمين العاملين في الأعلى. وتكون عناصر الوقود من نوع اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU) (19.75% يورانيوم-235 $U_3 O_8$) مع التغليف بالألومنيوم. ولديها مقاطع مربعة (80x80 مليمتر)، ويبلغ طولها الفعال 800 مليمتر. كل عنصر وقود لديه 19 صفيحة وقود مسطحة مغلفة بالألومنيوم (سماكة الصفيحة الواحدة 1.5 مليمتراً) مع قناة مبرد عرضها 2.7 مليمتراً. ويمكن وضع صناديق التشعيع داخل قلب المفاعل لتشعيع العينات.وتخدم المدخنة التي تحتوي على القلب أغراضاً عديدة : فهي توجه تدفق المادة المبردة خلال القلب،

تشتمل على أربع غرف مستقلة لنظام الإيقاف الثاني وتحمي قاب المفاعل في حالة حدوث جفاف عارض لحوض المفاعل. أما خارج القاب، فتوجد بنى مختلفة : مجموعة أنابيب نظام التبريد، الأجهزة النووية وغير النووية، عمود حراري من الغرافيت، أنبوبة حزمية مماسية، 3 أنابيب حزمية نصف قطرية، نظام تصوير بالأشعة النترونية تحت الماء، محطتان لنظام نقل الهواء المضغوط. وقد تم بناء جهازين للضغط العالي (حلقة لقضبان عناصر الوقود وأخرى لحزم الوقود) وتم تركيبهما، لكن لم يتم التفويض باستعمالهما. توضع عاكسات البريليوم حول القاب خارج مدخنة المفاعل. ويتم التحكم في تفاعلية القاب بواسطة 6 صفائح تحكم مصنوعة من سبيكة الفضة ـ الإنديوم ـ الكادميوم. تدار الصفائح بآليات موضوعة تحت حوض المفاعل. ويبرد القاب بواسطة ماء مزال منه المركبات المعدنية (Demineralized water) بتدفق قسري نحو الأعلى. بعد الإيقاف، تزال حرارة الإضمحلال (Decay heat) بواسطة الحمل الحراري الطبيعي لماء حوض المفاعل. وأنظمة التبريد المختلفة المتاحة هي : نظام التبريد الأولي (يزيل الحرارة من قاب المفاعل بتدفق قسري نحو الأعلى)، نظام تبريد الحوض (يزيل الحرارة المستلمة عند البنى خارج مدخنة القاب بدوران قسري نحو الأسفل) ونظام التبريد الثانوي (يبرد المبادلات الحرارية لنظام التبريد الأولي ونظام تبريد الحوض) .



مفاعل ETRR2 يعمل بطاقته الكاملة

تتم مراقبة المفاعل وضبطه وإدارته بواسطة أجهزة وأنظمة تحكّم كما يلي:

نظام حماية المفاعل (RPS)

تتم حماية المفاعل بهذا النظام، الذي يراقب حوالي 50 من بارامترات الأمان والإشارات لكشف أي ظرف غير آمن إحتمالياً، والذي يطلق أوتوماتيكياً أنظمة الأمان. تلك الأنظمة للأمان هي :

أ ـ نظام الإيقاف الأول
ب ـ نظام الإيقاف الثاني
ج ـ حقن ماء المدخنة
د ـ التفريغ (Evacuation) .

نظام مراقبة وضبط المفاعل (SCS)

يقدم نظام مراقبة وضبط المفاعل معلومات حول حالة المنشأة للمشغّل. وهو يمكّن من التحكم بالمفاعل والسيطرة على العملية التشغيلية وحلقات التحكم (Control loops) .

لقد تم تحميل الوقود في قلب المفاعل يوم 24 نوفمبر/تشرين الثاني، وتم بلوغ الحرجية (Criticality) الأولى يوم 27 نوفمبر/تشرين الثاني 1997. وقد قيست بارامترات نترونات القلب (التفاعلية، توزع القدرة) في نهاية العام .

في فبراير/شباط 1998 بدأت مرحلة تشغيل القدرة، وتم بلوغ الإستطاعة المقدرة (Rated power) للمفاعل (22 ميغاواط) يوم 11 مارس/آذار 1998 .

كما تم الحصول على شهادة قبول تمهيدية (Preliminary acceptance certificate) للمنشأة يوم 18 مارس/آذار 1998.

ملحق (ج)

السمات الأساسية لمفاعل HANARO

إن المفاعل البحثي الجديد في كوريا الجنوبية، وهو مفاعل التطبيقات النترونية المتقدمة عالية التدفق، يستخدم تقانة MAPLE لحوض مفاعل HANARO، حوض الخدمة، وحوض تخزين الوقود المستهلك .

مواصفات قلب المفاعل :

النوع : صهريج في حوض مفتوح
القدرة الحرارية القصوى : 30 ميغاواط
المادة المبردة : الماء الخفيف
العاكس : الماء الثقيل
مادة الوقود : U_3Si في مصفوفة ألومنيوم، نسبة التخصيب 19.75%
المادة الماصة : هافنيوم (Hf)
التبريد الثانوي : الماء الخفيف
مبنى المفاعل : حصري

يميز قلب المفاعل تركيبة من قلب داخلي مبرد ومهدأ بالماء الخفيف وقلب خارجي مبرد بالماء الخفيف ومهدأ بالماء الثقيل. للقلب الداخلي 28 موقع وقود و3 مواقع إختبارية. من بينها 20 موقع وقود لها شكل سداسي، و8 مواقع وقود لمجموعات الوقود الدائرية، التي تكون مطوقة بأربعة أغطية (Shrouds) للقضبان الماصة المتحكمة (Control absorber rods, CARs) وأربعة أغطية لقضبان الإيقاف (Shut-off rods, SORs) مصنوعة من الهافنيوم الطبيعي. والمواقع الإختبارية الثلاثة أيضاً سداسية الشكل وتستخدم للكبسولات. ويتألف القلب الخارجي من 4 مواقع وقود و4 مواقع اختبارية، والتي تكون مطوقة بإحكام في صهريج العاكس .

الوقود المستخدم في HANARO يكون يورانيوم منخفض التخصيب (LEU) بنسبة 19.75% في مركب سليسيد اليورانيوم، الذي يبعثر في مصفوفة الألومنيوم. إن التغليف بالألومنيوم، الذي يزيد المساحة السطحية لنقل الحرارة،

يحمي اليورانيوم من التآكل ويمنع نواتج الانشطار المشعة من الإفلات. وتكون كمية اليورانيوم في عنصر وقود واحد 69.1 غراماً في عنصر قلب عياري (Standard core element) و51.4 غراماً في عنصر قلب مختزل (Reduced core element). ويتم إدخال عناصر قلب مختزلة للحصول على توزع قدرة منتظم داخل مجموعة وقود، وتوضع عند الحلقة الأكثر بعداً من مجموعة الوقود السداسية. وهناك نوعان من مجموعات الوقود اللازمة لمفاعل HANARO : مجموعات الوقود السداسية بعدد 36 عنصراً ومجموعات الوقود الدائرية بعدد 18 عنصراً .

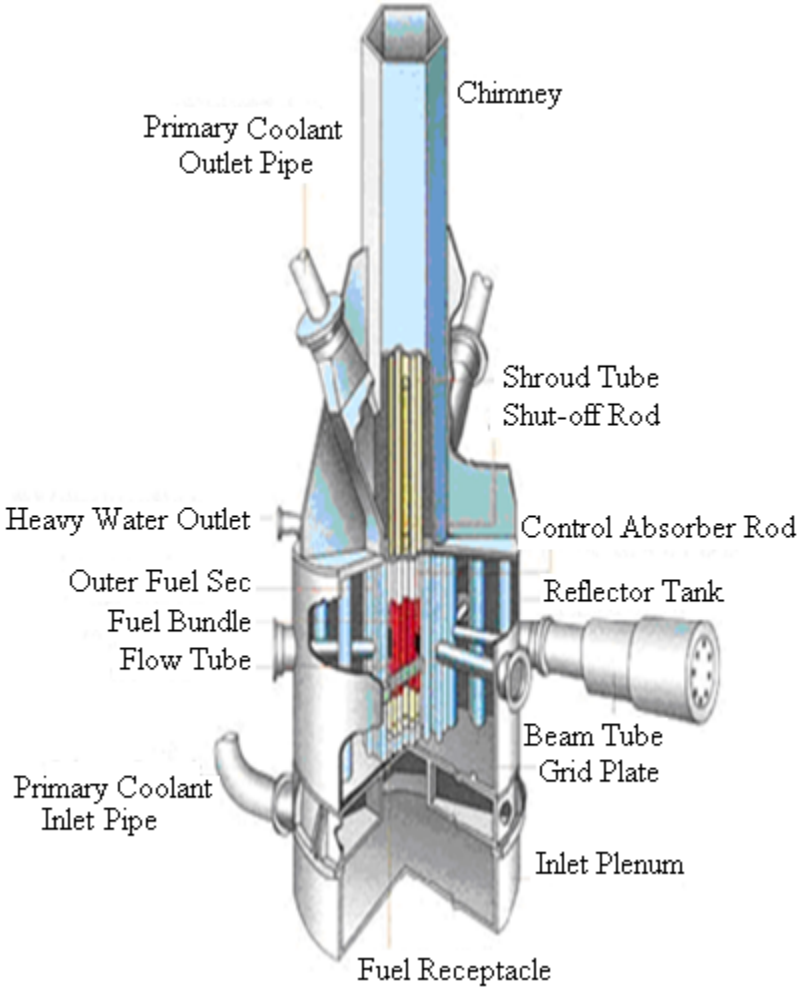
يدخل المبرد الرئيسي حيز الدخول (Inlet plenum) ويتدفق إلى الأعلى عبر قنوات الوقود ليقوم بالتبريد. يجمع المبرد في المدخنة، ومن ثم يخرج عبر منفثي خروج (Outlet nozzles). كل من الدارتين لديها 400 مضخة ضغط عالي، مبادل حراري من نوع الصفيحة قدرته 14 ميغاواط، وصمام لارجوعي (Check valve) مصمم للإغلاق مع التدفق العكسي .

تنضم الدارتان عند خط منعطف في قلب المفاعل. ويتفرع 10% من التدفق الراجع (التدفق المحول) إلى أسفل حوض المفاعل. وتتكون طبقة ماء ساخن على سطح الحوض من أجل أمان العاملين حول سطح الحوض .

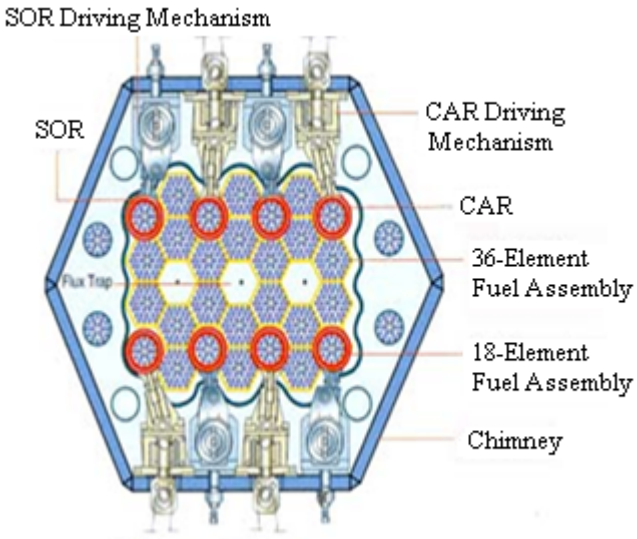
لإزالة حرارة الإضمحلال (Decay heat) هناك طريقتان متاحتان للدوران الطبيعي : الدوران الطبيعي في كل من الدارة والحوض. عندما تكون قوة إدارة الكثافة ليست كافية للدوران الطبيعي في الدارة، يبرد القلب بالدوران الطبيعي في الحوض عبر صمامين قلاّبين (Flap valves). ويبرد المبرد الثانوي بواسطة برج تبريد بأربع مراوح مبردة (Cooling fans). يكون صهريج العاكس المحيط بقلب المفاعل مصنوعاً من سبيكة الزركونيوم (Zircaloy-4) ومملوءاً بالماء الثقيل الذي يضخ في دائرة مغلقة. ويكون مزوداً بثقوب تجريبية أفقية ورأسية مختلفة .

توصل أربعة قضبان ماصة متحكمة (CARs) بناقل الحركة عبر رتاج مغنطيسي (Magnetic cluch) وتدار بواسطة أربعة محركات متدرجة مستقلة. ويتم التحكم في نظام تنظيم المفاعل بواسطة متحكم متعدد الدارات (Multi-loop

(controller يتضمن حساب التحكم. إن نظام حماية المفاعل لديه نظام لتصنيف الأمان. ويصبح المفاعل متعثراً بسقوط أربعة قضبان إيقاف (SORs)، وهي تسقط إذا فتحت صمامات الملفات (Solenoid valves) المتصلة بالدارة المائية (Hydraulic circuit) لآلية الإيقاف .



مجموعة بنية المفاعل



ترتيب قلب المفاعل

عناصر وقود مفاعل HANARO، 36 عنصر مجموعة وقود سداسية و18 عنصر مجموعة وقود دائرية، مع 3 فواصل (Spacers) على كل مجموعة وقود

ملحق (د أ)

مفاعل التدفق العالي (HFR) في Patten

مفاعل HFR هو أحد المفاعلات الإختبارية والبحثية متعددة الأغراض الأكثر قوة. ومع الخلايا الساخنة في المجموعة الإستشارية المختصة ببحوث الطاقة (NRG) بموقع Patten في هولندا، قدم لما يزيد على أربعة عقود، تتمات كاملة ومتكاملة لخدمات فحوص التشعيع وما قبل التشعيع كلما طلبت للبحث والتطوير الحالي والمستقبلي من أجل منظمات البحث والصناعة والطاقة النووية. ومنذ عام 1963، كان لمفاعل التدفق العالي سجل مميز من الإتساق والجدارة والإتاحية العالية، مع أكثر من 280 يوماً من التشغيل في السنة. ولمفاعل HFR 20 موضع تشعيع داخل القلب و12 بجانب الحوض، زيادة على 12 أنبوباً أفقياً لحزم التشعيع .

مع تنوع أجهزة التشعيع المخصصة لهذا الغرض ومع الخبرة الطويلة في تنفيذ مشاريع تشعيع صغيرة وكبيرة، يعد مفاعل HFR ملائماً، على وجه الخصوص، لاختبارات الوقود والمواد والمكونات في جميع خطوط المفاعل، بما في ذلك مفاعلات الإندماج النووي الحراري. علاوة على ذلك، فإن المعالجة بالنترونات وأشعة غاما، والبحث بالنترونات وخدمات التفتيش توظّف كلّها من قبل الصناعة والبحث، مثل التحليل بالتنشيط، العلاج بأسر البورون للنترونات (Boron neutron capture therapy, BNCT)، التصوير بالأشعة النترونية وحيود النترونات (Neutron diffraction) .

في السنوات الأخيرة، توسعت مهمة مفاعل التدفق العالي (HFR) في مجال المساندة الطبية عبر زيادة هامة في إنتاج النظائر المشعة، وعبر البدء في علاج المرضى بمنشأة BNCT. في ميدان إنتاج النظائر المشعة حقّق مفاعل HFR الريادة الأوروبية في حجم الإنتاج .

وتنصب برامج التشعيع الحالية في مفاعل HFR على الميادين التالية :

1 ـ البحث والتطوير في طاقة الإنشطار النووي، فمثلاً تشعيع المواد لدعم تمديد أعمار المنشآت النووية، الإختبار العابر لقضبان الوقود في مفاعلات الماء

الخفيف (LWRs) مسبقة التشعيع والتي تحتوي على ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) أو خليط الوقود (MOX)، واختبار الوقود والمواد لمفاعلات مبتكرة .

2 ـ دراسات تحول الأكتينيدات (Actinides) ونواتج الانشطار طويلة العمر من أجل الدورة المباشرة واللاّمتجانسة (Heterogeneous). دراسات لدعم ترميد (Incineration) البلوتونيوم (Pu) .

3 ـ دعم البحث والتطوير لطاقة الإندماج النووي الحراري ضمن برنامج طاقة الإندماج الأوروبي، فمثلاً اختبار التشعيع للمواد المرشحة لتكون الحائط الأول ومواد الحماية المفرعة (Diverter protection materials)، واختبار مواد بطانة التوليد (Breeding blanket materials) والنماذج الفرعية للبطانات المرجعية بواسطة تحليل الترتيوم .

4 ـ المعالجة بالنترونات وأشعة غاما، الفحص بخدمات التفتيش والبحث المبنية على النترونات، فمثلاً إنتاج النظائر المشعة، التحليل بالتنشيط، العلاج بأسر البورون للنترونات، التصوير بالأشعة النترونية وحيود النترونات .

مواصفات قلب مفاعل HFR بوقود LEU

في أكتوبر/تشرين الأول 2005، بدأ تحول مفاعل HFR من استخدام وقود اليورانيوم عالي التخصيب (HEU) إلى وقود اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU)، واكتمل في مايو/آذار 2006. كان لهذا التحول تأثير هامشي على تشغيل المفاعل. لدى المفاعل إجمالي 33 قضيب وقود وستة قضبان تحكم. وقد ساهمت مبادرة التحول في الجهود العالمية للحد من استخدام اليورانيوم عالي التخصيب والحساس بالنسبة لموضوع الإنتشار النووي. وقد أصدرت حكومة هولندا ترخيصاً جديداً للطاقة النووية للمفاعل في فبراير/شباط 2005، متضمناً استخدام وقود اليورانيوم منخفض التخصيب .

إدارة قلب المفاعل

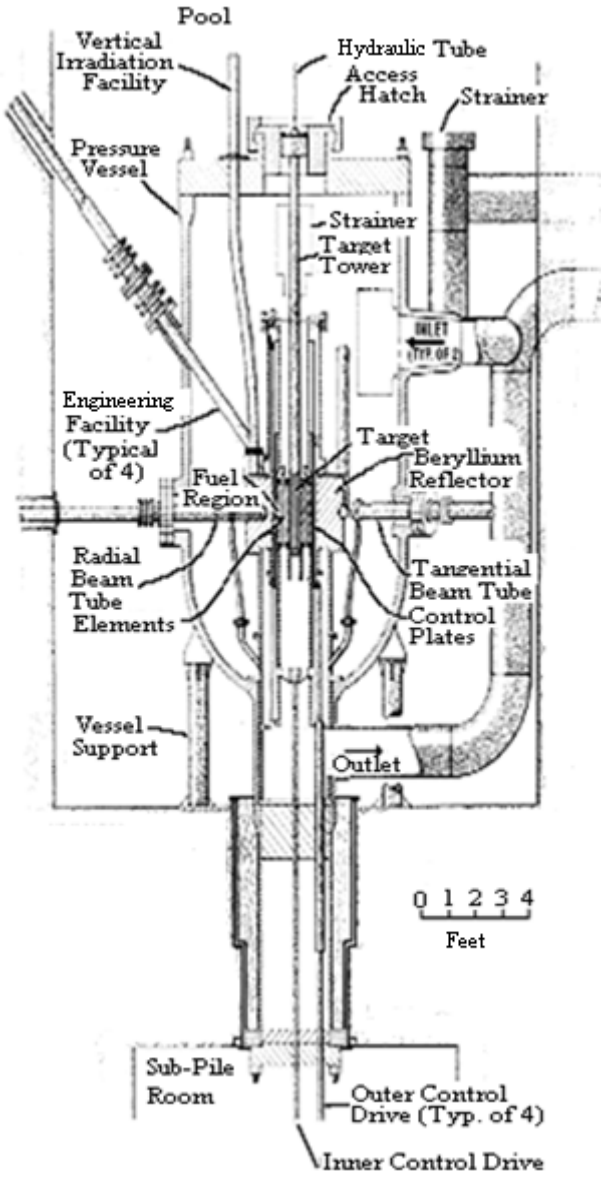
تبلغ مدة الدورة الجديدة 31.5 يوماً منها 28 يوماً بقدرة كاملة. العدد السنوي للدورات يساوي 10، مما يؤدي إلى استهلاك أمثل للوقود. ويتم جعل نموذج إعادة التحميل لقلب المفاعل أقرب إلى الكمال للحفاظ على الخصائص المميزة المثلى لمواضع التشعيع (Irradiation positions) .

ملحق (د 2)

مفاعل النظائر ذو التدفق العالي (HFIR) في ORNL

هذا المفاعل متعدد الجوانب، تبلغ قدرته 85 ميغاواط، ويستخدم كمفاعل اختباري ولإنتاج النظائر مع القدرة والمرافق اللازمة لأداء مجموعة متنوعة واسعة من التجارب الإشعاعية. ويعد HFIR متفرداً من حيث أنه يقدم أحد أعلى التدفقات النترونية في الحالة المستقرة والمتاحة في أي من مفاعلات العالم، وتيارات نترونية من الأنابيب الأفقية الأربعة لحزم التشعيع هي من بين الأعلى المتاحة. إن الغرض الأولي الأصلي من مفاعل HFIR كان لإنتاج نظائر ما وراء اليورانيوم، ومع ذلك، فقد تم تزويد مرافق تشعيع تجريبية عديدة إلى التصميم الأصلي وأخرى مختلفـة تمت إضافتها. تتضمن مرافق التشعيع التجريبيـة المتاحة :

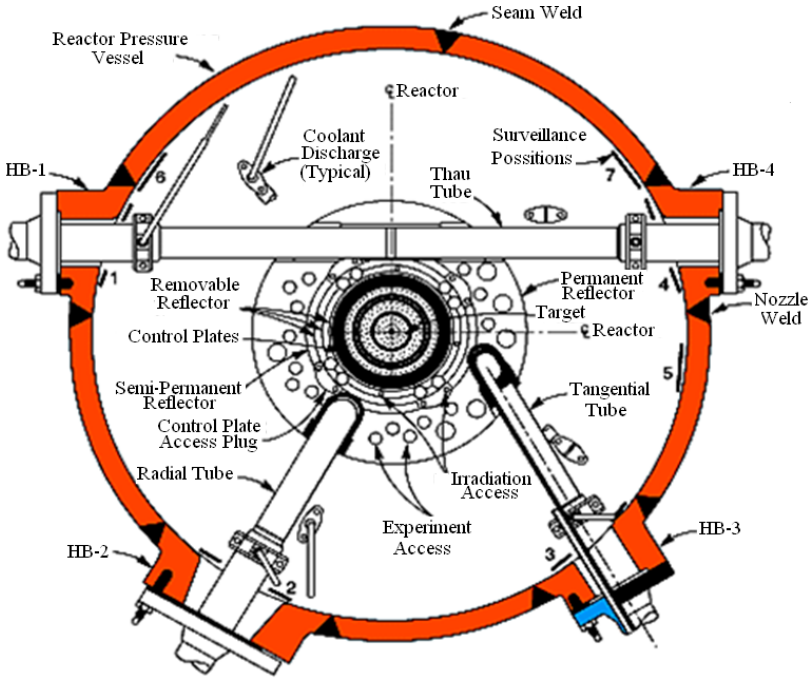
1 ـ أربع أنابيب أفقية لحزم التشعيع، والتي تبدأ في عاكس البريليوم .
2 ـ مرفق الأنبوب الهيدروليكي (المائي)، الذي يستقر في منطقة التدفق العالي جداً لمصيدة التدفق (Flux trap)، والذي يسمح بإدخال وإزالة عينات التشعيع بينما يشتغل المفاعل .
3 ـ ثلاثون موضعاً هدفياً في مصيدة التدفق التي تحتوي عادة على قضبان إنتاج ما بعد اليورانيوم، ولكن يمكن استخدامها للتشعيع في تجارب أخرى (إثنان منها مواضع هدفية مجهزة زودت بتعديلات حديثة) .
4 ـ ستة مواضع هدفية سطحية مستقرة عند الحافة الخارجية لمصيدة التدفق .
5 ـ مرافق تشعيع رأسية وافرة بمقاييس مختلفة مستقرة عبر عاكس البريليوم .
6 ـ أنبوبتا ضغط هوائي في عاكس البريليوم، تسمحان بإدخال وإزالة عينات التشعيع بينما يشتغل المفاعل للتحليل بالتنشيط .
7 ـ أربعة مرافق دخول مائلة، تسمى "مرافق هندسية"، تستقر قرب الحافة الخارجية لعاكس البريليوم .



شكل رقم (1)

مقطع رأسي لوعاء الضغط وقلب مفاعل HFIR

علاوة على ذلك، تستخدم مجموعات الوقود المستهلك لتشعيع غاما في مرفق التشعيع بأشعة غاما في حوض المفاعل. إن HFIR هو مفاعل يعمل بنمط مصيدة التدفق، ويستخدم البريليوم كعاكس، ويتم تبريده وتهدئته بالماء الخفيف، ووقوده من اليورانيوم-235 عالي التخصيب. ويتم إحتواء مجموعة قلب المفاعل في وعاء ضغط (Pressure vessel) قطره 8 أقدام (2.44 متراً) مستقر في حوض من الماء. وتكون قمة وعاء الضغط على بعد 17 قدماً (5.18 متراً) أسفل سطح الحوض، والمستوى الوسطي الأفقي للمفاعل يبعد 27.5 قدماً (8.38 متراً) أسفل سطح الحوض. يبين الشكل رقم (1) مقطعاً رأسياً لوعاء الضغط وقلب المفاعل، في حين يبين الشكل رقم (2) مشهد مستوى مقطعي لقلب المفاعل .

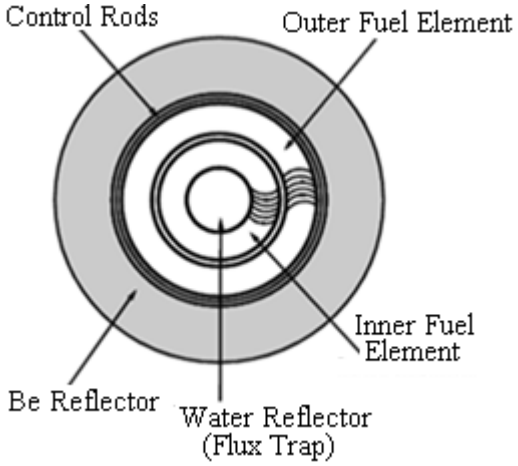


شكل رقم (2)

مشهد مستوى مقطعي في مفاعل HFIR

توضع آليات إدارة لوحة التحكم في غرفة تحت وعاء الضغط. وتزود هذه السمات التدريع الضروري للعمل فوق قلب المفاعل، كما تسهل بصورة كبيرة الدخول إلى مناطق وعاء الضغط وقلب المفاعل والعاكس .

يتكون قلب المفاعل من سلسلة من المناطق الحلقية موحدة المركز (Concentric annular regions)، يبلغ ارتفاع كل منها حوالي قدمين (0.61 متراً). وهناك ثقب قطره 5 بوصات (12.7 سنتيمتراً)، يشار إليه باسم "مصيدة التدفق"، وهو يشكّل مركز القلب. يحوي الهدف، نموذجياً، كوريوم-244 ونظائر ما بعد اليورانيوم أخرى ويوضع على المحور الرأسي للمفاعل بداخل مصيدة التدفق. تتألف منطقة الوقود من عنصري وقود متمركزين. يحتوي العنصر الداخلي على 171 صفيحة وقود، ويحتوي العنصر الخارجي على 369 صفيحة وقود. وتتقوس صفائح الوقود في شكل لولب (Involute)، وبذلك تزود إتساعاً ثابتاً لقناة المادة المبردة. يتوزع الوقود (U_3O_8 ـ سيرميت الألومنيوم) بغير انتظام على طول قوس اللولب لتقليل نسبة الذروة نصف القطرية إلى متوسط كثافة القدرة. ويتم تضمين "سم" قابل للإحتراق (Burnable poison) "بورون" في عنصرالوقود الداخلي، لتقليل متطلبات التفاعلية السالبة لصفائح التحكم. يبلغ العمر الوسطي لقلب المفاعل، بتحميل تجريبي نموذجي، حوالي 22 يوماً بقدرة 85 ميغاواط. وتحاط منطقة الوقود بحلقة موحدة المركز من عاكس البريليوم سماكتها قدماً واحداً تقريباً (0.3 متراً). تنقسم هذه المنطقة بدورها إلى ثلاث مناطق : العاكس القابل للنقل أو الإزالة، العاكس نصف الدائم، والعاكس الدائم. ويحاط البريليوم بعاكس مائي ذي سماكة متناهية الصغر (Infinite thickness). في الإتجاه المحوري، ينعكس المفاعل بواسطة الماء. ويبين الشكل رقم (3) رسماً تخطيطياً لقلب مفاعل HFIR.



شكل رقم (3) : رسم تخطيطي لقلب مفاعل HFIR

توضع صفائح التحكم، في شكل أسطوانتين رفيعتين موحدتي المركز محملتين "بالسم"، في منطقة حلقية بين عنصر الوقود الخارجي وعاكس البريليوم. وتدار هذه الصفائح في اتجاهات متضادة. تزداد التفاعلية بتحرك الأسطوانة الداخلية نحو الأسفل، والتي تستخدم فقط للتنظيم والتسوية، وليس لديها وظيفة أمان سريعة. وتتألف أسطوانة التحكم الخارجية من أربع ربعيات (Quadrants) منفصلة، كل منها بوسيلة إدارة مستقلة وبآلية إطلاق آمنة. وتزداد التفاعلية عندما ترتفع الصفائح الخارجية. وجميع صفائح التحكم لديها ثلاث مناطق محورية لمحتوى "سمي" مختلف، مصممة لتقليل نسبة الذروة المحورية إلى متوسطة كثافة القدرة خلال عمر قلب المفاعل. وأي قضيب منفرد، أو أسطوانة منفردة، تكون لديه (أو لديها) القدرة على إيقاف المفاعل. ويعكس تصميم نظام التحكم وتجهيز المفاعل التوكيد الواقع على أهمية تواصلية التشغيل، بينما يتم الحفاظ على التشغيل الآمن. وترتب ثلاث قنوات أمان مستقلة في نظام توافق يحتاج إلى موافقة إثنتين من الثلاث لإيقافات السلامة. تُتمم هذه السمة بنظام اختباري موسع "فوري مباشر" (On-line) والذي يجيز اختبار وظيفة السلامة لقناة واحدة في أي وقت أثناء التشغيل. وبالإضافة إلى ذلك، هناك ثلاث قنوات تحكم آلي تعمل كمنظومة، وهكذا فإن إخفاق قناة مفردة لن يؤثر بصورة هامة على التشغيل. كل هذه العوامل تساهم في تواصلية التشغيل بمفاعل HFIR. تدخل المادة المبردة الرئيسية إلى وعاء الضغط عبر ماسورتين قطر كل منهما 40.64 سم فوق قلب المفاعل، وتمر خلال القلب، وتخرج عبر ماسورة قطرها 45.72 سم تحت القلب. يبلغ معدل التدفق حوالي 16,000 غرام/دقيقة (1.01 متر^3/ثانية)، والذي منه 13,000 غرام/دقيقة (0.82 متر^3/ثانية) يتدفق خلال منطقة الوقود، والباقي يتدفق عبر الهدف والعاكس ومناطق التحكم. إن النظام مصمم ليشتغل بضغط دخول إسمي يبلغ $10x3.33^6$ باسكال. تحت هذه الظروف، تكون درجة حرارة المادة المبردة عند الدخول 120°ف (49°م)، وتكون درجة حرارة الخروج المقابلة 156°ف (69°م)، وهبوط الضغط خلال القلب يكون حوالي $10x7.58^5$ باسكال. ويتوزع تدفق المادة المبردة من المفاعل إلى ثلاث أو أربع مجموعات متطابقة من المبادلات الحرارية ومضخات الدوران، تستقر كل منها في خلية منفصلة قرب المفاعل وأحواض التخزين. تحتوي كل خلية كذلك على صمام هبوط (Let-down valve) يتحكم

في ضغط المادة المبردة الرئيسية. ويزيل نظام المبرد الثانوي الحرارة من النظام الرئيسي وينقلها إلى الجو عن طريق مرور الماء فوق برج تبريد مستحث بالسحب (Induced-draft cooling tower) يتكون من أربع خلايا. وتتكون عادة دورة وقود مفاعل HFIR من تشغيل بقدرة كاملة عند 85 ميغاواط لفترة تتراوح من 21 إلى 23 يوماً (تعتمد على التجربة وحمل النظائر المشعة في المفاعل)، يتبعها توقف عند نهاية الدورة من أجل إعادة التزود بالوقود. يستمر التوقف النموذجي حوالي 4 إلى 6 أيام، ومع ذلك، تمتد فترات التوقف أحياناً عند الطلب للسماح بتبديل لوحة التحكم، معايرات، صيانة وتفتيشات. ويمكن إنجاز عملية دخول وإزالة تجريبية أثناء التوقف في نهاية الدورة. إن مقاطعة دورة وقود من أجل تجربة أو لتركيب أو لإزالة يعد معيقاً بشدة ومثبطاً للهمة. وتكون الحيودات عن البرنامج الزمني المحدد غير متكررة، وعادة يكون سببها التبديل الدوري لمكونات المفاعل الرئيسية، القصور في أحد مكونات التجربة أو المفاعل، إلخ .

ملحق (هـ)

مفاعل OPAL

وهو مفاعل غاطس في حوض مفتوح، وقوده سليسيد اليورانيوم عالي التخصيب، يبرد بالماء الخفيف ويستعمل الماء الثقيل كعاكس. ويكون تصميم قلب المفاعل مدمجاً للغاية، لتأمين أعلى ناتج نتروني ممكن. وقد أصبح المفاعل الجديد حرجاً يوم 2006/8/12، وظل يشتغل بقدرة كاملة منذ 2006/11/11 .

قلب المفاعل

تصميم قلب المفاعل مدمج للغاية لزيادة التدفق النتروني إلى الحد الأعلى، ويوضع تحت سطح الماء بعمق 10 أمتار، قرب قاع الحوض الرئيسي، محاطاً بمدخنة تبريد من سبيكة الزركونيوم. يتألف القلب من منظومة من 16 مجموعة وقود مصنوعة من صفائح سليسيد اليورانيوم منخفض التخصيب، منثورة (Interspersed) بواسطة قنوات يدور خلالها ماء التبريد ليحمل بعيداً الحرارة المولّدة من جراء تفاعل الإنشطار النووي. وتتم إزالة المركبات المعدنية من ماء التبريد الذي يدور إلى الأعلى بقوة الضخ أثناء التشغيل الإعتيادي، ولكن مع إيقاف المفاعل، يضمن الحمل الحراري الطبيعي إزالة حرارة الإضمحلال المتبقية. ويتم التحكم في تفاعلية المفاعل بواسطة صفائح ماصة للنترونات (Neutron absorbing plates)، تتحرك عمودياً.

يحاط قلب المفاعل بصهريج عاكس يحوي الماء الثقيل. وهو يمثل عاكساً للنترونات ويضمن وفرة التدفقات النترونية العالية فوق حجم ضخم. كذلك يشكل الصهريج العاكس سمة أمان زائدة حيث أن استنفاده السريع، في حالة طارئة، يحرم قلب المفاعل من النترونات المنعكسة اللازمة لإبقاء الحرجية. وتكون مرافق تشعيع الأهداف وموجهات استخلاص الأحزمة النترونية موجودة داخل الصهريج العاكس. وفي داخل حوض المفاعل، بالقرب من القلب والصهريج العاكس، توجد قنوات التبريد، الأجهزة النووية وغير النووية، وكذلك مرافق التشعيع .

أنظمة التبريد

يقوم نظام التبريد الرئيسي بتشتيت حرارة الإنشطار بواسطة الماء الخفيف، في دوران قسري نحو الأعلى. ويضمن التصميم الإستقرار الحراري لدخول ماء

التبريد في حدود متقاربة، بصرف النظر عن درجة الحرارة الخارجية حسب الظروف الجوية. خارج الحوض، ينقسم نظام التبريد الرئيسي إلى ثلاث دارات، لكل منها مضخة ومبادل حراري قابل للتعامل مع 50% من قدرة المفاعل. وهكذا، فإن إحدى الدارات تصبح نظام مساندة إضافي زائد عن الحاجة. إن كل من أنظمة التبريد التي تخدم حوض المفاعل والحوض الإحتياطي لديها المهمات الوظيفية التالية :

1 ـ تشتيت الحرارة الناتجة من مرافق التشعيع أثناء التشغيل العادي، بواسطة الدوران القسري نحو الأعلى للماء الخفيف .
2 ـ تشتيت حرارة إضمحلال قلب المفاعل والتبريد المستمر لمرافق التشعيع عندما يكون المفاعل متوقفاً، بواسطة الدوران الطبيعي .
3 ـ الحفاظ على درجة حرارة مياه الحوض في حدود المدى الموصوف، بالنسبة لجميع ظروف التشغيل المتوقعة .
4 ـ تشتيت الحرارة المتولدة بواسطة عناصر الوقود المستهلك .

ويكون لعاكس النترونات المحيط بقلب المفاعل دورة الماء الثقيل المستقلة الخاصة به وكذلك نظام تبريد وتنقية مستقل .

أما نظام التبريد الثانوي فيقوم باستخلاص الحرارة من دارة التبريد الرئيسية، من كل من نظامي تبريد حوض المفاعل والحوض الاحتياطي، من نظام تبريد العاكس النتروني ومن مصادر حرارية أخرى داخل المفاعل. كل هذه الحرارة يتم تشتيتها نهائياً إلى البيئة بواسطة أبراج التبريد (Cooling towers).

ويضمن نظام التنقية والتوزيع بقاء مياه التبريد ضمن معايير نقاء صارمة. ولبلوغ ذلك، يكون الخيار هو طبقات راتنج المبادل الأيوني المختلط (Mixed ion exchange resin beds). تؤسس طبقة مياه عليا دافئة وتبقى كذلك بواسطة نظام دوران وتنقية آخر، لتقليل معدل جرعة الإشعاع على سطح الحوض. وتبقى نوعية الماء الثقيل ضمن المعايير التشغيلية الآمنة بواسطة طبقة أخرى لراتنج المبادل الحراري المختلط. ويحافظ على تراكيز الدوتريوم والأكسجين ثابتة عن طريق إعادة الإتحاد (Recombination). إن كل المواسير المتصلة بحوض المفاعل تكون فوق مستوى قلب المفاعل. وتزود آليات الفصل بالمثعب

(Siphon-breaking mechanisms) لمنع فراغ الحوض بالتثعيب (Siphoning). وتكون لدى الدارة الرئيسية وتلك لحوض المفاعل صمامات مروحية (Butterfly valves) تسمح بالدوران الطبيعي .

الأمان

إن أنظمة أمان وحماية المفاعل التي تصل بالمفاعل إلى حالة إيقاف آمنة يجب أن تكشف أي ظرف تشغيلي شاذ (Anomalous operating conodition) .

إيقاف المفاعل

يولج نظام الإيقاف الأول بسرعة خمس صفائح ماصة للنترونات إلى داخل قلب المفاعل. وعند انتهاء مهمتها، فإنها تسقط مباشرة بفعل الجاذبية. أما نظام الإيقاف الثاني فيقوم بإفراغ الصهريج العاكس من مائه الثقيل، والذي يتدفق ثانية بفعل الجاذبية إلى داخل صهريج التخزين المستقر تحت قلب المفاعل. ولا يتم تزويد أية طاقة لجعل هذين النظامين يعملان .

تبريد قلب المفاعل

تتميز مضخات نظام التبريد الرئيسي بدواليب تعديل السرعة بالقصور الذاتي (Inertial Flywheels) من أجل التبريد المتواصل أثناء فترة الهبوط لعملية الإيقاف. وليس ضرورياً أي عكس للتدفق لتشتيت حرارة المفاعل بالدوران الطبيعي، حيث أن كلا من الضخ والحمل الحراري يجعلان تدفق الماء خلال قلب المفاعل دائماً نحو الأعلى. ويكون حوض المفاعل ذاته بالوعة (Sink) حرارة كبيرة، قادرة على تبريد القلب تحت أية ظروف. في حالة حادث فقدان المبرد (Loss of coolant accident, LOCA)، فإن المياه في الحوض تمتلئ ثانية بواسطة الجاذبية قرب مدخنة القلب لتبريد قلب المفاعل .

الإحتواء (Contention)

أثناء التشغيل الإعتيادي، يدور الهواء المكتنف (Ambient air) ويتم فحص جودته باستمرار. وعند الضرورة، يمكن عزل مبنى المفاعل عن البيئة.

تحت هذه الظروف، يتم إبقاء جميع البارامترات، مثل ضغط الهواء ودرجة الحرارة والرطوبة، ثابتة بواسطة نظام خاص لتبديد الطاقة (Energy dissipation) .

التعامل مع النفايات

يتم التحكم في مواد النفايات النووية وغير النووية وتصنّف وتعزل وتراقب في منشأة خاصة بالمفاعل. النفايات السائلة المشعة الناتجة أثناء تشغيل المفاعل ومنشآته ومختبراته، يتم تصنيفها وجمعها وخزنها مؤقتاً. وللنظام حوض إعادة ملء خاص (Special refill pool)، بسعة كافية لتجميع مياه المفاعل. وتخزن عناصر الوقود المشعة في سلال تستقر في داخل الحوض الإضافي. ويكون تصميم تلك السلال وظروف الخزن ملائمة لضمان الحفاظ على سلامة تغليف الوقود. وللحوض الخدمي (Service pool) تدابير احتياطية من أجل تقليص حجم النفايات المعدنية الصلبة .

مرافق بحثية

كمصدر نتروني معول عليه ومرن للغاية، سوف يخدم مفاعل OPAL أربعة أغراض رئيسية على الأقل :

1 ـ إنتاج النظائر المشعة
2 ـ البحث العلمي
3 ـ تحليل المواد بالتنشيط النتروني
4 ـ تطعيم صبة السليكون (Silicon ingot doping)، لصناعة أشباه الموصلات .

وليس من المعتاد بالنسبة لمفاعل "إنتاج"، مركّز على إنتاج النظائر المشعة، أن يستخدم كوحدة أكاديمية وعلمية رئيسية، لكن تلك هي الحالة مع مفاعل OPAL .

مرافق تشعيع

في مقاربات مختلفة جداً لإنتاج النظائر المشعة، توضع الأهداف عند المواضع المؤسسة سابقاً داخل الصهريج العاكس .

وتوجد تدابير إحتياطية لمرافق التشعيع التالية :

1 ـ مرافق تشعيع عامة الغرض
2 ـ مرافق تشعيع بالدفعات (Batch)
3 ـ مرافق تشعيع كبيرة الحجم
4 ـ مختبر التنشيط النتروني
5 ـ مختبر السليكون، "المطعم" بالتحول النتروني
6 ـ مرافق التعامل مع المواد المشعة (الخلايا الساخنة) للتعامل مع الهدف، بما في ذلك شحنها وتفريغها ونقلها إلى مصنع إنتاج النظائر المشعة .

بسعات عديدة، سوف يخدم مفاعل OPAL إحتياجات مختلفة تماماً لمجموعات أسترالية صناعية وطبية وعلمية ومنجمية .

الحوض الرئيسي يحتوي القلب، مع مرافق للتشعيع الموضعي، في حين أن الحوض الإضافي معد لتخزين عناصر الوقود المستحرقة، ولديه تدابير احتياطية لتقليص حجمها

ملحق (و)

التطعيم التحولي للسليكون (Transmutation Doping of Silicon)

يحتاج استخدام أشباه الموصلات في الإلكترونيات الكهربائية إلى خصائص إستثنائية للمادة بسبب مستويات القدرة العالية التي تسري في الأجهزة. إن بلورات أشباه الموصلات غير المثالية، ذات الخواص غير المنتظمة، سوف تجعل الأجهزة الكهربائية غير مستقرة بتأثير خطير إحتمالياً على أنشطة يومية عديدة. ويعد السليكون، إلى حد بعيد، شبه الموصل الأكثر مثالية ولذلك فالسليكون هو المادة المفضلة للأجهزة الكهربائية. ومنذ أوائل السبعينيات، زاد استخدام مادة السليكون أحادي البلورة بصورة سريعة، وبذات جهود ضخمة لتطوير تقنيات من أجل ظهور بلورات سليكون مثالية إلى حيز الوجود. تلك البلورات هي المادة الأساسية لمدى واسع من الأجهزة الإلكترونية والإلكترونيات الضوئية .

بالنسبة للأجهزة الكهربائية، حتى تشتغل عند مستويات قدرة وقراءات فولطية معينة، لا بد من تطعيم السليكون بشوائب تجعل من الممكن سريان التيار خلال مجمل السليكون. ويعد تطعيم بلورات السليكون بالفسفور عن طريق التشعيع بالنترونات هو التقنية الأكثر تفوقاً من حيث ضبط التطعيم وهي تزيل بكفاءة عدم الإنتظامات في بلورة السليكون عالي المقاومية (High-resistivity silicon crystal). وعندما تستخدم النترونات لتبديل مقاومية السليكون، تنتج ذرات طُعم الفسفور (Phosphorous dopant) بتحول السليكون-30 إلى الفسفور-31 بواسطة التشعيع النتروني الحراري في مفاعل ذري .

تستخدم تقنية التطعيم التحولي بالنترونات (NTD) عندما يحتاج التطبيق إلى مستويات تطعيم عالية الدقة والإنتظام. ويبين الجدول رقم (1) مستويات طُعم نموذجية للتطعيم التحولي للسليكون بالنترونات وقيم المقاوميات المقابلة لها. إن السوق الأكبر للسليكون من هذه النوعية المنتظمة والنظيفة إلى أبعد حد هو سوق الأجهزة الكهربائية التي تستخدم أشباه الموصلات. ومن أجل أداء التيرستورات

(Thyristors) والمقومات (Rectifiers) و (IGBT'S) و (Power MOSFET's) فإن الإنتظام والإتساق ضروري من أجل الحصول على فولطيات عالية، تزيد نموذجياً على 300 فولط، ومن أجل معرفة أعطالها جيداً.

لتطعيم السليكون عالي المقاومية (أي في المدى المبين بالجدول 1)، فإن التطعيم التحولي بالنترونات (NTD) هو الطريقة الأكثر دقة وانتظاماً إلى أبعد حد لإدخال الفسفور. ولغرض المقارنـة، فإن المقاومية وتوزع المقاومية، اللّذين يعكسان تركيز الحامل (Carrier)، هما البارامتران الرئيسيان في أغلب الأحيان. وسوف نعلق على الصلة بين تركيز الطُعم والمقاومية فيما بعد. برغم ذلك، فإن المقاومية متناسبة تقريباً مع مقلوب تركيز الطُعم (Reciprocal dopant concentration) (جدول رقم 1) .

جدول رقم (1)

تراكيز التطعيم بالفسفور والجرعات النترونية المقابلة لإدخال الفسفور في مدى المقاومية النموذجي لسليكون NTD

المقاومية (أوم سم)	تركيز الطُعم (10^{13} ذرة/سم^3)	Ppba فسفور	جرعة النترونات (10^{16} سم$^{-2}$)
30	14.5	2.9	86
100	4.3	0.85	24
200	2.1	0.42	10.5
300	1.4	0.28	7
500	0.85	0.17	4
1000	0.45	0.086	2

في هذا التطبيق، لاحظ أن تقنية NTD سوف تناقش مع التركيز على العوامل التي تحدد تجانسية بلورات السليكون المطعمة بالتشعيع وكذلك خواص سليكون NTD المهمة للمستخدمين النهائيين. في مدى المقاومية الأقل، تكون دقة التشعيع هي عامل الريبة السائد، بينما عند المقاوميات الأعلى تصبح متطلبات المادة البادئة تقييدية. وسوف نبين أن الحد الأعلى الحالي لتطعيم NTD لبلورات FZ كبيرة يساوي 4000 أوم سم بقيمة بسيطة مسجلة لتباين المقاومية نصف القطرية (Radial resistivity variation, RRV) أقل من 8%. كذلك، فإن الإستقرار الجيد لمقاومية سليكون NTD تحت ظروف عملية مشابهة للجهاز سوف تتم البرهنة عليه .

تقنية التحول بالنترونات

في طرق التطعيم الكيميائية التقليدية ـ على سبيل المثال دمج الشوائب من الصهير (Melt) أثناء نمو البلورة ـ تلعب الديناميكا الحرارية دوراً هاماً. وبما أن جميع الشوائب الهامة تقريباً لديها معاملات توزع (Distribution coefficients) أقل بكثير من الوحدة، فإنها تميل إلى البقاء في الصهير. وهذا يعني أن توزع الشوائب في البلورات المنماة (Grown crystals) ليس منتظماً. ومع ذلك، فإن الضبط المحكم للصهير ومعدل التغذية لشوائب التطعيم يستخدمان لتقليل عدم الإنتظام هذا في منتجات PFZ (منطقة طفو مطعمة في الطور الغازي). أما في التطعيم التحولي بالنترونات (NTD)، فيهمل دور الديناميكا الحرارية. ويتم تعيين التجانسية بواسطة انتظام (Uniformity) التدفق النتروني في المفاعل على حجم بلورة السليكون وكذلك بنقاوة البلورات المنماة .

يتم تخليق ذرات الفسفور (P) المستحثة بالتشعيع بواسطة الأسر النتروني من قبل ذرة سليكون-30، مكونة نظير سليكون-31 غير المستقر. ومن ثم يتحول ^{31}Si إلى ^{31}P بإصدار بيتا، بعمر نصف يساوي 2.6 ساعة (أنظر الجدول رقم 2). بالإضافة إلى هذا التفاعل، يحدث عدد من التفاعلات الثانوية، أهمها مبين في الجدول رقم (2) .

جدول رقم (2)
تفاعلات نووية

$^{30}Si(n,\gamma)$	^{31}Si	$\rightarrow$ (2.6 hrs) $\rightarrow {}^{31}P + \beta$
$^{28}Si(n,\gamma)$	^{29}Si	
$^{29}Si(n,\gamma)$	^{30}Si	
$^{31}P\ (n,\gamma)$	^{32}P	$\rightarrow$ (14.3 hrs) $\rightarrow {}^{32}S + \beta$

تظهر حسابات بسيطة أن تلك التفاعلات ليست ذات أهمية، حيث أن إنتاجها لنظائر جديـدة يكون مهملاً عند مستويـات تطعيم معقولـة. يتم

تعريـض البلورات إلى الجرعة النترونية المطلوبة بوضعها قريباً من قلب المفاعل النووي، مما يؤدي إلى تدفقات تشعيع متجانسة. ومع ذلك، فإن التدفق النتروني ليس متجانساً بشكل مثالي، ومستويات الشوائب الخلفية في البلورات المنماة ليست جديرة بالإهمال. وكلاهما يزيد عدم الإنتظامات في صورة التطعيم النهائية. كما يضر التشعيع جزئياً ببنية البلورة، أساساً بإدخال عيوب شبيهة بالنقاط. هذه العيوب لا بد من إزالتها قبل استخدام سليكون NTD في صناعة الأجهزة. ويتم هذا عن طريق التلدين بالحرارة (Anealing) عند درجات حرارة مرتفعة في أفران نظيفة. وبعد خطوة التلدين، يتم قياس جميع مقاومات البلورات المشععة .

متطلبات التشعيع

يتم تنفيذ التشعيع عند موضعي تدفق في الطرف الأعمق للعمود الحراري وثالث عند موضع ما تدفقه أقل. إن صمامات النترونـات الحراريـة وتدريع الغاما (Gamma shielding) المتضمن في العمود الحراري يجعلان تلك المواضع ملائمة لتشعيع السليكون خصيصاً :

ـ موضع تدفق عالي (High Flux position, HFP)

$\Phi_{th} = 1.0x10^{13}$ n/cm^2.s

$\Phi_f = 1.2x10^{12}$ n/cm^2.s (0.625 eV $\leq E \leq$ 1.0 MeV)

$\Phi_f = 6.0x1010$ n/cm2 .s (E $\geq$ 1.0 Mev)

ـ موضع تدفق منخفض (Low Flux Position, LFP)

$\Phi th = 1.0x1012$ n/cm2 .s

$\Phi_f = 8.0x109$ n/cm2 .s (0.625 eV $\leq E \leq$ 1.0 MeV)

$\Phi_f = 1.2x10^{12}$ n/cm^2.s (E $\geq$ 1.0 Mev)

لكل من موضعي التدفق يكون $(\Phi_{th} / \Phi_f) > 10.0$. وستكون درجة الحرارة المقدرة القصوى لبلورة السليكون أقل من 100°م .

عدم تجانسيات التشعيع

لقد أهملنا في هذا القسم تأثيرات شوائب الطُعم في البلورات غير المطعمة المنماة كما هي (As-grown)، ولكن لبلورات NTD عالية المقاومية (بعدد قليل من شوائب الطُعم المضافة)، فإن شوائب التطعيم الخلفية في البلورات المنماة كما هي يجب أن تؤخذ في الحسبان. وهكذا يكون التقريب جيداً في البلورات ذات المقاومية القليلة .

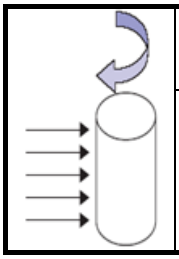
بإهمال حالة المقاومية للبلورة غير المطعمة، فإن تجانسيات مظهر التطعيم يتم تعيينها بالتشعيع فقط. ونحن، في الأغلب، نميز بين نوعين من التجانسية : إنتظام التطعيم على طول محور البلورة، والذي يلعب دوراً بسيطاً، أو لا يلعبه، بالنسبة للرقاقات المنفردة المقطوعة من البلورة والتباين نصف القطري، الذي يعد سمة حاسمة لكل رقاقة مقطوعة من البلورة. ويعرف تباين المقاومية نصف القطرية بالمعادلة التالية :

$$RRV = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{R_{MIN}} \times 100\% \qquad (1)$$

حيث R_{MAX} و R_{MIN} المقاوميتان القصوى والدنيا مقاستان على الوجهين الطرفيين للبلورات الأسطوانية. إن RRV هو العامل الأكثر أهمية للتحكم في صناعة السليكون، لأن مصنّعي أشباه الموصلات الكهربائية لا يمكنهم أن يسمحوا بتباينات عالية عبر الرقاقات المقطوعة من البلورات الأسطوانية. ويتم تشعيع بلورات السليكون غير المطعمة في قنوات رأسية أو أفقية بجانب قلب المفاعل. وللبلورات أقطار تصل إلى 150 ملم وأطوال نموذجية تصل إلى 60 سم خلال التشعيع. في حالة تدفق نتروني غير متجانس، سيكون مظهر المقاومية لبلورة السليكون المطعمة متأثراً ولهذا فإن له أهميته للتحكم في هيئة التدفق أثناء دورة التشعيع. ويمكن أن يكون الحل لمشكلة التدفق النتروني غير المتجانس إما بتسطيح (Flattening) التدفق على حساب الشدة أو بتحريك البلورة أثناء التشعيع. ويعين مظهر المقاومية نصف القطرية بتوهين (Attenuation) التدفق النتروني أثناء اختراق بلورة السليكون .

يبلغ طول الإضمحلال في السليكون حوالي 19 سم، ولذا فإنه بالنسبة للبلورات المستقرة تكون عدم تجانسية التدفق عالية نوعاً ما، كما نرى في الجدول رقم (3). وهذا بدوره يزيد من تباينات المقاومية نصف القطرية العالية .

جدول رقم (3)
تباينات التدفق نصف القطري

	بلورة دوارة (Rorating)	بلورة مستقرة (Stationary)	قطر البلورة
	1.0	33	3"
	1.7	41	4"
	2.5	48	5"
	3.9	54	6"

ولتقليـل هذا التأثيـر، يجب تدوير البلورات أثناء التشعيع. وإذا اعتبرنـا البلورات الأسطوانيـة كأنها محاطة بمـادة لها نفس طـول الإضمحلال كالسليكون نفسه، يمكننا حساب عدم إنتظام الجرعة عن طريق تكامل المتوسط الزمني للتدفق عند مسافة من محور البلورة على مدى فترة التدوير. والنتيجة ستكون كما يلي :

$$\frac{\Phi(a)}{\Phi(0)} \approx 1 + \frac{a^2}{4b^2} \qquad (2)$$

حيث Φ تمثل التدفق المتوسط عند مسافة من محور البلورة، a هي نصف قطر البلورة و b هي طول الإضمحلال .

تظهر النتائج المبينة في الجدول رقم (3) أن التدوير يعطي تحسيناً معتبراً بالمقارنة مع التشعيعات المستقرة. تطبيقياً، يكون الموقف مختلفاً إختلافاً طفيفاً، حيث أن المادة المحيطة بالبلورات لديها أطوال إضمحلال أطول عادة من 19 سم. في معظم مرافق التشعيع، تكون عدم تجانسية التدفق نصف القطري أقل بكثير من المحوري .

تباينات المقاومية

لتحويل اللاّتجانسات (Inhomogenities) في التدفق إلى تباينات في المقاومية، فإن العلاقات بين المقاومية وجرعة النترونات يجب أن تؤخذ في الإعتبار. أولاً، يجب أن ندرس العلاقة بين المقاومية ومستويات التطعيم، آخذين في الحسبان حقيقة أن شوائب كل من المتقبل والمانح (Acceptor & Donor)

تكون موجودة في مجمل بلورة السليكون المنماة كما هي. إن متعدد السليكون (Polysilicon) يكون عادة مطعم بالفسفور، ولكن نظراً للإختلاف الهام في معاملات فصل البورون (B) والفسفور (P)، فإن أي تلوث أو محتوى للبورون في متعدد السليكون أثناء نمو البلورة سوف يؤثر بشكل كبير على مقاومية البلورة الأحادية النهائية .

تعطى مقاومية مجمل البلورة الأحادية بالمعادلة التالية :

$$p = \frac{1}{ne\mu_e + pe\mu_p} \qquad (3)$$

حيث e تمثل وحدة الشحنة، n و p تركيزا الإلكترونات والفجوات، μe و μp حركية الإلكترون والفجوة على التوالي. في الأنواع النقية من بلورة السليكون التي نناقشها هنا، يمكن اعتبار μe و μp ثوابت، ولهذا فإننا نحتاج فقط إلى تقدير n و p. بفرض أن الشوائب النشيطة كهربائياً هي فقط البورون كمتقبل والفسفور كمانح، فإنه يمكن أن تعطي المعادلات التالية تقديراً جيداً للغاية :

$$n = \pi\sqrt{N_P - N_B)^{2+}4n_i^2} + \pi\,(N_P - N_B) \quad (4)$$

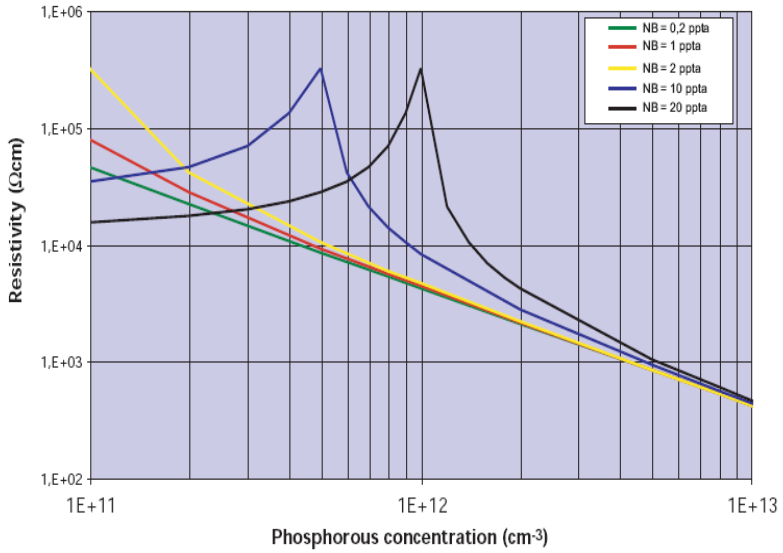
و

$$pn = n_i^2 \qquad (5)$$

حيث N_P و N_B تركيزا الفسفور والبورون، و n_i تركيز الحامل الذاتي ويكون عادة مساوياً 10x1.0^{10} سم$^{-3}$ عند 300 كلفن (k) .

والآن يمكننا عمل افتراضات بشأن مستوى شائبة البورون، وحساب مقاومية السليكون من المعادلات (3)، (4) و (5). وتظهر بعض النتائج في الشكل رقم (1)، حيث تم بيانياً تسجيل مقاومية البلورة الأحادية مقابل تركيز الفسفور لتراكيز بورون في المدى 0.2 ـ 20 جزءاً من التريليون، ذري (ppta). إن متعدد السليكون العادي لديه تركيز فسفور يساوي 10^{12} سم$^{-3}$ تقريباً. من الشكل رقم (1) يمكن أن نرى أنه كلما ظل تركيز البورون أقل من 10 أجزاء من التريليون، ذري (ppta) (~10^{11} سم$^{-3}$)، لا يكون هناك تأثير عملي لمطعمات

البورون (Boron dopants) على المقاومية الكلية. ويعد هذا هاماً لأنه يعطي احتمالات لإنتاج تطعيم تحولي بالنترونات (NTD) مستقر يصل إلى 500 أوم سم دون أن نأخذ في الحسبان مساهمة التطعيم بالبورون .



شكل رقم (1)

مقاوميات مقدرة في سليكون ذاتي قريب عند 300 كلفن مقابل تركيز الفسفور لمستويات خلفية مختلفة من البورون. μ_e و μ_p مثبتة حكماً عند 1500 (cm^2/Vs) و 450 (cm^2/Vs)

لتراكيـز بورون أكبر من 10 أجزاء من التريليون، ذري (ppta)، يظهر مجمل المقاومية قمم متميزة عند تراكيز فسفور تتراوح ما بين 10^{11} و10^{12} سم$^{-3}$، والمقاربة لمحتوى الفسفور في متعدد السليكون العادي. عند القمة، يتغير نوع السليكون من نوع p- إلى نوع n-.

إن تأثير شوائب البورون المتبقية يكون أكثر وضوحاً بالنسبة لأنواع المقاومية الأعلى الجديدة في متعدد السليكون المطعم بالفسفور الذي لديه مستويات فسفور تنخفض إلى 10^{11} سم$^{-3}$. وحتى تعطي تلك الأنواع الجديدة من متعدد

السليكون نتيجة يمكن العول عليها والتنبؤ بها من حيث مقاومية مجمل البلورة الأحادية، يجب أن تبقى تراكيز البورون أقل من جزء واحد من التريليون، ذري (ppta). وهي مهمة صعبة بالنسبة لمصنّعي متعدد السليكون، لكنهم قادرون على القيام بها وهناك متعدد سليكون في غاية النقاوة (Ultra pure polysilican, UPS) بشوائب بورون متبقية في منطقة دون الجزء من التريليون، ذري (ppta) موجود في السوق .

إن السلوك غير المتغير تقريباً في مقاومية البلورة الأحادية (مفترض محتوى منخفض من البورون) يحضنا لتوصيف المادة البادئـة للتطعيم التحولي بالنترونات (NTD) من حيث مقاوميتها وحدها. وإذا قمنا بذلك، وفرضنا أن مستويات مانح الفسفور المدخل بواسطة التشعيع يتم تأيينها بصورة كلية وتتوزع بانتظام، فإننا نحصل على دلالة بسيطة على تجانسية البلورات المطعمة .

إن كمية الفسفور التي يتم إدخالها بواسطة التحول تعطى بالمعادلة التالية :

$$N_{p.NTD} = k\Phi \qquad (6)$$

حيث

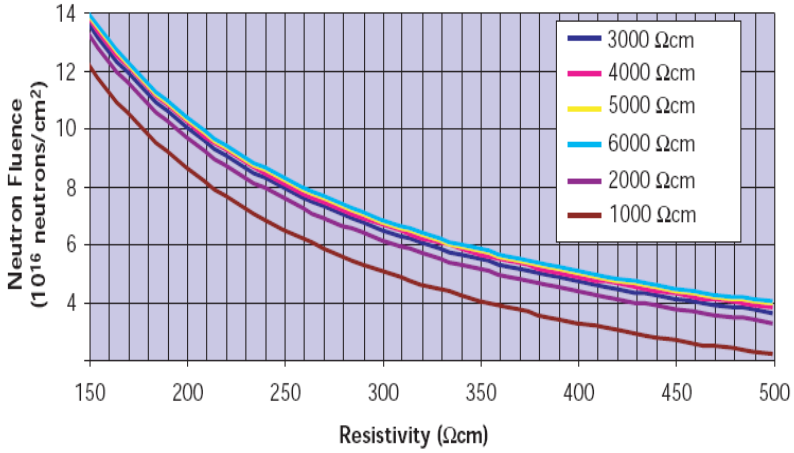
$$k = dc(^{30}Si)\sigma \qquad (7)$$

Φ هي جرعة النترونات، d هي الكثافة الذرية للسليكون، $c\ (^{30}Si)$ هي الوجود النسبي لنظير ^{30}Si و σ هي المقطع العرضي لتفاعل التحول .

من المعادلتين (3) و (6)، نحصل على العلاقة التالية بين جرعة النترونات ومقاومية الهدف :

$$\frac{1}{\rho_{target}} = \frac{k\Phi}{\mu_e e} + \frac{1}{\rho_{initial}} \qquad (8)$$

حيث ρ_{target} و $\rho_{initial}$ مقاوميتا البلورتين المطعمة والمنماة كما هي، على التوالي. μ_e هي حركية الإلكترون و e هي الشحنة الإلكترونية. يبين الشكل رقم (2) هذه العلاقة الشاملة تقريباً بين جرعة النترونات ومقاومية السليكون بالنسبة لمقاوميات متباينة للمادة البادئة .



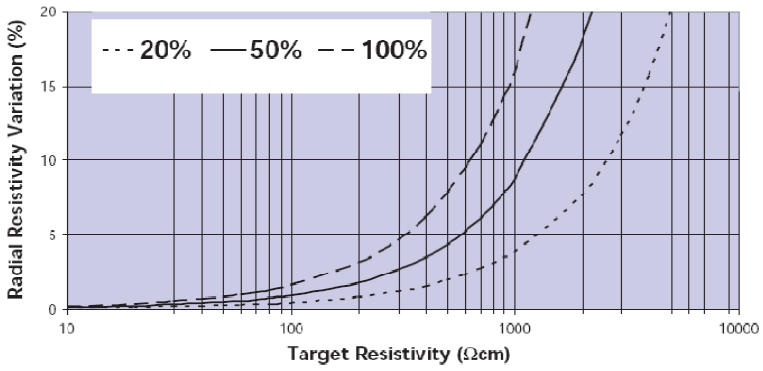
شكل رقم (2)

جرعة النترونات مقابل مقاومية الهدف المتحصل عليها لبلورات ذات مقاوميات متباينة للمادة البادئة

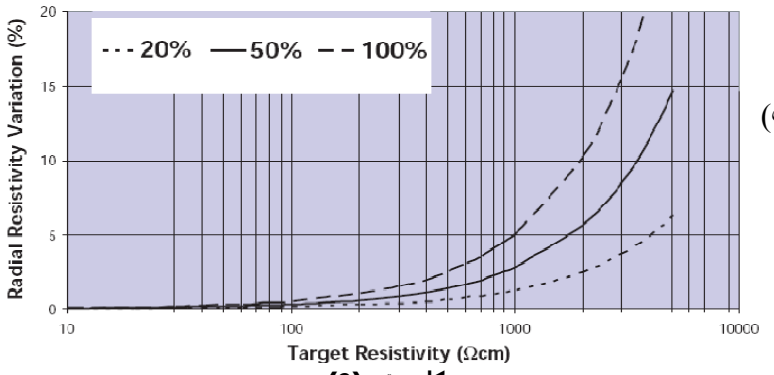
يمثل الخط الأفقي في الشكل رقم (2) تشعيعاً مثالياً. ومن الواضح أن مقاومية المادة البادئة، وبالتالي تجانسية البلورات المنماة كما هي، مهمة للنتيجة النهائية. وكما يظهر في الشكل رقم (2)، فإن تقارب المنحنيات في هذا الشكل من بعضها البعض عند الجرعات الأعلى، أي عند المقاوميات الأقل، يوضح التأثير المتزايد عند المقاوميات الأعلى للبلورة المنماة كما هي على النتيجة النهائية. على سبيل المثال، يمكن أن نرى أنه مع مقاوميات البلورة غير المطعمة التي تتراوح بين 3000 و6000 أوم سم، والتطعيم بجرعة $10x4^{6}$ نترون/سم^2، نحصل على مقاوميات سليكون أحادي البلورة تساوي حوالي 500 أوم سم ± 4%، بينما جرعات مقدارها $10x1^{17}$ نترون/سم^2 تؤدي إلى مقاومية تساوي 200 أوم سم بتباين مقاومية كلي قيمته ± 3% فقط .

إن منتجات التطعيم التحولي بالنترونات (NTD) جميعها تقيد تقريباً تباينات المقاومية الكلية وراء نطاق تلك المتحصل عليها بواسطة أية وسائل أخرى لإنتاج السليكون المطعم من نوع -n. ومع ذلك، فإن تباين المقاومية نصف القطرية (RRV) الكلي لمادة السليكون غير المطعم البادئة يفرض بعض الحدود على تباين المقاومية نصف القطرية الكلي للتطعيم التحولي بالنترونات المتحصل عليه إلى الحد الأدنى. يبين الشكل رقم (3 أ) حدود RRV الكلي لبلورة أحادية

غير مطعمة أولية بمقاومية كلية وسطية تساوي 5000 أوم سم كدالة لمقاومية التطعيم التحولي بالنترونات الكلية للهدف ولتباينات مختلفة للمقاومية نصف القطرية الكلية (بنسبة مئوية). وكما نرى في الشكل رقم (3 أ)، لا توجد مشكلة في الحصول على منتجات NTD ذات RRV قليل طالما تكون مقاومية الهدف أقل من 100 أوم سم، ولكن لمقاوميات أعلى للهدف يصبح الأمر أكثر صعوبة للحصول على تباينات قليلة للمقاومية إذا تجاوز RRV 20% للسليكون غير المطعم. وبرغم ذلك، فإذا كانت المقاومية الوسطية للسليكون غير المطعم عالية بما فيه الكفاية، يمكن إبقاء RRV قليلاً، حتى في حالات يتجاوز فيها RRV 50% للسليكون غير المطعم. وهذا يظهر في الشكل رقم (3 ب) للحالة التي تبلغ فيها المقاومية الكلية الوسطية للسليكون غير المطعم 15000 أوم سم .



(أ)



(ب)

شكل رقم (3)

(أ) تباين المقاومية نصف القطرية للسليكون غير المطعم بمقاومية وسطية تساوي 5000 أوم سم.
(ب) تباين المقاومية نصف القطرية للسليكون غير المطعم بمقاومية وسطية تساوي 15000 أوم سم.

ملحق (ز)

الدورات التدريبية بالمفاعلات البحثية

1 ـ دورات قياس الإشعاع

نموذج الذرة، النظير المشع، ألفا، بيتا وغاما، بالإضافة إلى الإشعاع النتروني، التفاعل التبادلي بين الإشعاع والمادة، كشف الإشعاع ومقياسية الجرعة، قياسات معيارية مثل النشاط، العمر، الطاقة، الجرعة، إلخ والحساب الإحصائي .

تطبيق المفاعل

مصدر النترونات الحرارية والسريعة، إنتاج النظائر الضعيفة وقصيرة العمر للأغراض القياسية، تجارب التدريع في القنوات التجريبية للعمود الحراري، قياس حقل الإشعاع قرب المفاعل .

متطلبات المفاعل

التدفق النتروني : بحد أدنى $10x5^{6}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$.
قنوات تجريبية وعمود حراري .

2 ـ دورات تقنيات النظائر المشعة

إن تطبيق واستخدام النظائر المشعة في العلم والتقانة يتم التعامل معهما في دورات تقنيات النظائر المشعة. وهذا يشمل إنتاج النظائر المشعة وقياساتها، تطبيقاتها كمقتفيات، وتقنيات قياس خواص المادة بالتصوير الشعاعي، أساسيات التصوير الشعاعي بالإضافة إلى التحليل بالتنشيط .

تطبيق المفاعل

إنتاج المقتفيات المشعة، مصدر إشعاع لإثبات التصوير الشعاعي بالإضافة إلى التحليل بالتنشيط .

متطلبات المفاعل

التدفق النتروني : بحد أدنى $10x5^{6}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$.
قنوات تجريبية .

3 ـ نظرية المفاعل

تتم معالجة المواضيع التالية في دورات نظرية المفاعل :

التفاعل التبادلي بين النترونات والمادة، حقول النترونات، حسابات الحرجية باستعمال حسابات النقل والإنتشار، حسابات المفاعل المتجانس واللاّمتجانس ونظرية الإضطراب (Perturbation theory) .

تطبيق المفاعل

المقاطع العرضية لقياسات التدفق الرنيني (Resonance flux) وفوق الحراري (Epithermal) والحراري (Thermal)، معامل التجوف (Void coefficient)، طول الإنتشار (Diffusion length)، العاكسية (Albedo)، العمر الفرمي (Fermi age)، المطياف البلوري (Crystal spectrometer)، إلخ.

متطلبات المفاعل

التدفق النتروني : بحد أدنى $10x5^{6}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$.

قنوات تجريبية عبر وسط قلب المفاعل، عمود حراري بالمياه أو الغرافيت.

4 ـ ديناميات المفاعل

في دورات ديناميات المفاعل (Reactor dynamics) تتم تغطية السلوك الزمني للمفاعلات. وهذا يشمل : حركيات (Kinetics) المفاعلات صفرية الإستطاعة، تأثيرات درجة الحرارة على التفاعلية، الإستحراق (Burn-up)، التوليد، تسمم المفاعل بالإضافة إلى محاكاة الحاسوب لمنشآت القدرة والتحكم بها .

تطبيق المفاعل

تجربة حرجة، معايرة قضيب التحكم، معامل درجة حرارة التفاعلية، قيم تفاعلية الوقود، قياس فترة المفاعل، التضاعف دون الحرج (Sub-critical multiplication)، غرف الإنشطار والتأين، كواشف النترونات ذاتية القدرة .

متطلبات المفاعل

التدفق النتروني : بحد أدنى $10x5^{6}$ نترون. سم$^{-2}$. ثانية$^{-1}$.

مدخل للوقود من أجل التحميل وإعادة التحميل. قنوات تجريبية لإيلاج كواشف النترونات، أنابيب نترونية محكمة الإغلاق لمولدات النترونات، وقضبان تحكم إضافية .

ملحق (ح)

البرامج التدريبية ذات الصلة بالمفاعلات البحثية

1 ـ تدريب الطلاب والفيزيائيين

يسمح مفاعل بحثي ضعيف الإستطاعة (< 1 ميغاواط) بإجراء تدريبات في المجالات التالية :

أ ـ قياس الإشعاع النووي وتطبيقه مثل النشاطية، الجرعة، عمر النصف، الطاقة، التفاعل مع المواد، التحليل بالتنشيط وعلم الإحصاء، إلخ .

ب ـ نظرية المفاعل، النقل النتروني باستخدام مقاييس الطيف (Spectrometers)، أجهزة فرز النترونات (Neutron choppers)، مقاييس جرعة التنشيط الوريقية (Foil activation dosimeters)، إلخ .

ج ـ حركيات المفاعل، ديناميات المفاعل .

د ـ تشغيل المفاعل والتحكم به باستخدام حاسوب مرافق لمحاكاة تشغيل المفاعل والتحكم به .

هـ ـ الحرجية وزيادة قدرة المفاعل .

و ـ قياسات التدفق النسبي والمطلق .

ز ـ قياسات التفاعلية .

ح ـ معايرة قضيب التحكم .

ط ـ قياس معامل درجة الحرارة .

ي ـ قياس تأثير تسمم المفاعل .

ك ـ قياس الطيف .

ل ـ تعيين معامل التجوف .

م ـ قياس التدريع والوقاية الإشعاعية .

ن ـ التصوير بالأشعة النترونية .

س ـ التحليل بالتنشيط .

ع ـ تعيين النظير المشع .

2 ـ تدريب مستخدمي التشغيل

لهذا النوع من المتدربين، يكون التشديد على الإجراءات والعمليات التشغيلية التي يتضمنها تشغيل المفاعل وسلامته، وبالأخص ما يلي :

أ ـ تحميل الوقود وإعادة تحميله .
ب ـ مقاربة للحرجية .
ج ـ تأثيرات النترونات الفورية والمتأخرة
د ـ تأثيرات التسمم (زينون، ساماريوم)
هـ ـ تأثيرات درجة الحرارة
و ـ تأثيرات التفاعلية
ز ـ تباينات الحمل
ح ـ التجهيز والمعايرة
ط ـ قياسات التدفق والقدرة
ي ـ حركيات المفاعل وديناميكاته
ك ـ الوقاية الإشعاعية
ل ـ الكيمياء الإشعاعية

3 ـ التدريب للبحث : التطبيقات ذات الصلة

يمكن أيضاً إستخدام المفاعلات ضعيفة الإستطاعة لسلسلة كاملة من التطبيقات ذات الصلة، التي تتضمن حقل البحث الأساسي والتطبيقي، مثل :

أ ـ علم الآثار القديمة .
ب ـ التطبيقات البيولوجية .
ج ـ التطبيقات الكيميائية .
د ـ علوم الأرض .
هـ ـ العلوم البيئية .
و ـ التطبيقات الطبية .
ز ـ الميتالورجيا أو علم المعادن .
ح ـ التطبيقات الصناعية .