

مفاعل الماء الثقيل المضغوط الكندي (CANDU)

Abstract

The Atomic Energy of Canada Limited (AECL) designed the CANDU (Canada Deuterium Uranium) reactor to provide safe and reliable nuclear power. The CANDU reactor is a Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) that uses heavy water (Deuterium oxide - D_2O) as moderator and coolant and natural uranium as its fuel. The AECL was established in 1952 and it has been building nuclear reactors for over 50 years, delivering a wide variety of CANDU nuclear reactors such as: CANDU 6 and the Enhanced CANDU 6 (EC6). In this article the characteristics of CANDU will be reviewed.

مقدمة

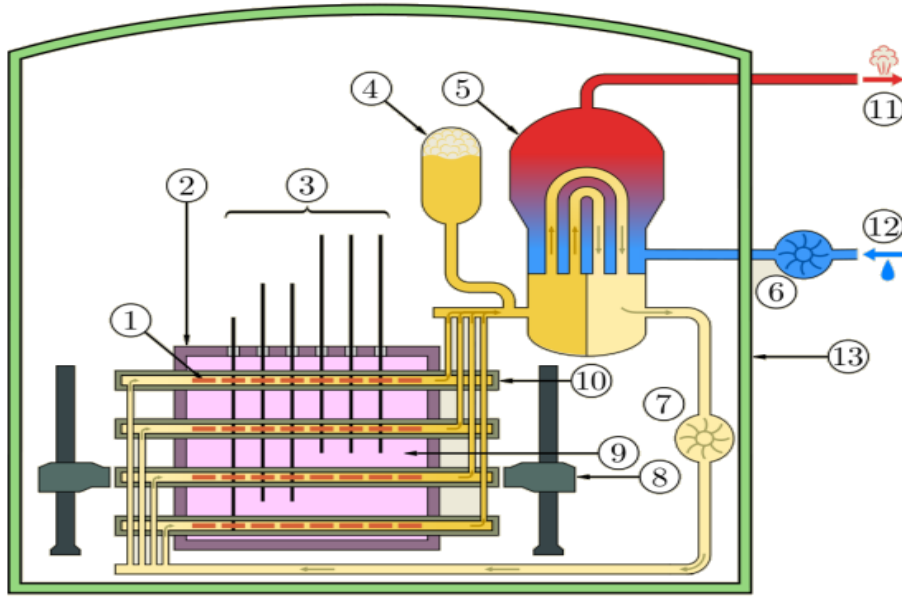
صممت شركة الطاقة الذرية الكندية (The Atomic Energy of Canada Limited, AECL) المفاعل كاندو (Canada Deuterium Uranium, CANDU)، (كندا – ديوتريوم – يورانيوم)، للحصول على طاقة نووية موثوقة وآمنة. المفاعل كاندو هو مفاعل ماء ثقيل مضغوط (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR). يستخدم هذا المفاعل الماء الثقيل (أكسيد الديوتريوم) كمهدئ ومبرد ويستخدم اليورانيوم الطبيعي كوقود. تأسست شركة الطاقة الذرية الكندية عام 1952. ومازالت منذ ذلك الوقت تنتج أنواع مختلفة من مفاعلات الماء الثقيل مثل : المفاعل كاندو 6 والمفاعل كاندو 6 المعزز (المطور) (Enhanced CANDU 6, EC6).

لقد بدأ الاهتمام بالمفاعلات التي تُهدأ وتبرد بالماء الثقيل والتي تدعى مفاعلات الماء الثقيل في كندا منذ الحرب العالمية الثانية، حيث اهتمت كندا بأبحاث مفاعلات الماء الثقيل من أجل الاستخدامات العسكرية. اهتم العلماء الكنديون بعد الحرب بتطوير مفاعلات الماء الثقيل عندما اكتشفوا وجود كميات كبيرة من فلز اليورانيوم الطبيعي في كندا والذي يستخدم كوقود لمفاعلات الماء الثقيل. ساعد استخدام اليورانيوم الطبيعي كوقود في عدم اعتماد كندا في إنتاج وقودها على الولايات المتحدة أو الدول الأخرى، كما وفر عليها التكاليف الباهظة لبناء محطات إغناء الوقود. نجح الكنديون في تطوير مفاعل الماء الثقيل الذي سمي مفاعل كاندو (CANDU) وقاموا بتصديره إلى الخارج. يستطيع الماء الثقيل واليورانيوم الطبيعي تشكيل مفاعل حرج لصغر المقطع الفعال لامتصاص لنواة الديوتريوم (D^2). إن المقطع الفعال لامتصاص الديوتريوم أصغر من المقطع الفعال لامتصاص الهيدروجين في الماء العادي (H^1). الديوتريوم أثقل من الهيدروجين ولذلك تكون فعاليته كمهدئ أقل من فعالية الهيدروجين. تخسر النترونات وسطياً طاقة أقل لدى تصادمها بالديوتريوم وتتطلب مسافة أكبر وعدداً أكبر من التصادمات للوصول إلى الطاقة الحرارية. لذلك، تتطلب مفاعلات الماء الثقيل حجماً أكبر من مفاعلات الماء العادي وبالتالي فهي تتطلب حجماً أكبر لوعاء المفاعل. وللتخلص من مشكلة استخدام وعاء المفاعل الضخم، استخدم في مفاعل الكاندو فكرة أنابيب الضغط المتعددة.

أقسام المفاعل كاندو

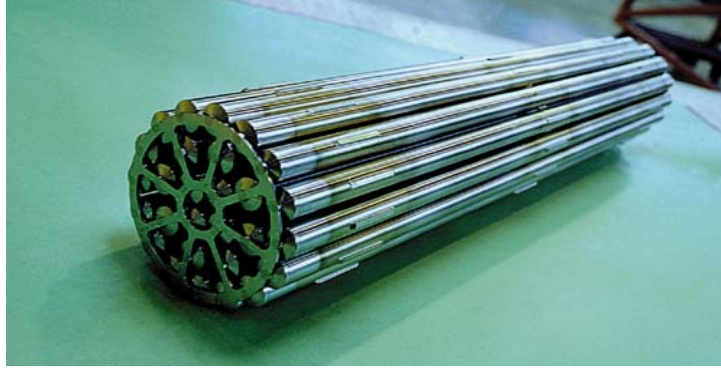
يتألف مفاعل الكاندو من خزان أسطواني (calandria) أفقي يحوي في داخله الماء الثقيل. يخترق هذا الخزان مئات من الأنابيب الأفقية التي تحتوي على الوقود. يتدفق الماء الثقيل المبرد عبر هذه الأنابيب تحت ضغط قدره 10 ميغا باسكال ولا يصل إلى درجة الغليان. لا يتم في مفاعل الكاندو ضغط وعاء المفاعل ككل بل يتم ضغط الماء الثقيل المبرد الذي يتدفق في الأنابيب فقط. يبين الشكل (1) الأجزاء الرئيسية لمفاعل كاندو. تتطلب دارة التبريد الواحدة أنبوبي وقود ودارتي تبريد.

يدخل الماء الثقيل المفاعل بدرجة حرارة قدرها 266°C ويغادر بدرجة حرارة قدرها 3100°C . يخرج الماء الثقيل من المفاعل إلى مولد البخار الذي يكون على شكل حرف U مقلوب. يولد البخار في الدارة الثانوية ويستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية. يرجع المبرد إلى المفاعل ويمر في اتجاه معاكس لاتجاه الخروج في أنبوب وقود مجاور حيث يسخن ويذهب إلى مولد بخار ثانٍ. يستعمل الضاغط كما في مفاعلات الماء المضغوط لرفع الضغط أو تقليله في الدارات الأولية للماء الثقيل. يسخن الماء الثقيل الذي يستخدم كمهدئ والمتوضع داخل الخزان الأسطواني (Calandria) للمفاعل. يبرد هذا الماء بدارة تبريد منفصلة تلاحظ في أسفل الشكل. يُصنع وقود مفاعل الكاندو على شكل حزمة (Bundles) من قضبان الوقود والتي تتألف من 37 أنبوباً مفرغاً من الزركونيوم تملأ بحبيبات أكسيد اليورانيوم الطبيعي (انظر الشكل (2)).



الشكل (1) الأجزاء الرئيسية لمفاعل الكاندو

- 1 - مجموعة وقود، 2 - أسطوانة، 3 - قضبان تعديل، 4 - ماء ثقيل، 5 - مولد بخار، 6 - مضخة ماء عادي، 7 - مضخة ماء ثقيل، 8 - آلية التزود بالوقود، 9 - ماء ثقيل مهدئ، 10 - أنبوب مضغوط، 11 - بخار، 12 - ماء بارد، 13 - الحاوية.



الشكل (2) حزمة قضبان الوقود في مفاعل الكاندو

إن الصفة المميزة والفريدة لمفاعل الكاندو هي إمكانية تزويده بالوقود أثناء عمله، حيث يتم ذلك باستخدام جهازين خاصين للتزود بالوقود ويقعان على جانبي أنبوب الوقود. تلقم حزمة الوقود باستخدام أحد جهازي التلقيح في أنبوب الوقود وتدفع في أنبوب الوقود. تخرج حزمة الوقود المستهلكة من الطرف الثاني لأنبوب الوقود وتنتقل تحت الماء إلى مخزن الوقود المستهلك حيث تخزن هناك لفترة من الزمن قبل إرسالها لمحطات معالجة الوقود المستهلك. لا تلاحظ عملية التزود بالوقود أثناء عمل المفاعل في مفاعلات الماء العادي حيث تغلق هذه المفاعلات تماماً أثناء عملية تبديل الوقود. لم يقتصر إنتاج مفاعلات الكاندو على كندا فقط بل تمكنت ألمانيا والأرجنتين واليابان من تصنيع هذا النوع من المفاعلات أيضاً.

مفاعل كاندو 6 المعزز (المطور) (The Enhanced CANDU6, EC6)

تم تصميم المفاعل كاندو 6 المعزز (المطور) من قبل شركة الطاقة الذرية الكندية (Atomic Energy of Canada Limited, AECL) لتوفير طاقة نووية موثوقة وأمنة. حيث يعتبر المفاعل شكلاً متطوراً عن المفاعل كاندو 6. لقد تم تصميم المفاعل لكي يستثمر عالمياً ويكون خاضعاً لكافة إجراءات التنظيم للطاقة الذرية الكندية وتطبق عليه كافة معايير أمان الوكالة الدولية للطاقة الذرية. المفاعل كاندو هو مفاعل ماء ثقيل مضغوط (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR) حيث يستخدم الماء الثقيل (D_2O) كمهدئ ومبرد واليورانيوم الطبيعي كوقود.

لمحة تاريخية

لقد صممت شركة الطاقة الذرية الكندية مفاعلات الكاندو التي شملت مفاعلات CANDU 6 و EC6. بدأت شركة الطاقة الذرية الكندية (AECL) العمل عام 1952. وهي منذ ذلك الوقت مازالت تنتج المفاعلات النووية منذ أكثر من خمسين عاماً حيث تقدم الخدمات النووية في المجالات التالية :

- البحث والتطوير في مجال المفاعلات
- التصميم والهندسة لمفاعلات الكاندو
- بيع التجهيزات النووية ومفاعلات الكاندو
- إدارة المنشآت النووية
- الإشراف على بناء وإقلاع وتفكيك المفاعلات النووية
- تقديم التكنولوجيا المتقدمة الخاصة بالمجال النووي
- إدارة النفايات المشعة ودفن النفايات المشعة.

لقد بنت شركة الطاقة الذرية الكندية 34 مفاعلاً من نوع الكاندو إلى الآن في شمال أمريكا وآسيا وأوروبا. أنجزت شركة الطاقة الذرية الكندية (AECL) منذ 1996 سبع محطات من النوع CANDU6. لقد قامت الشركة بتطبيق الخبرة التصميمية والتشغيلية للمفاعل CANDU 6 لدى تصميم المفاعل EC6. يتمتع المفاعل CANDU 6 بالخصائص الفيزيائية التالية :

- استخدام اليورانيوم الطبيعي كوقود.
- احتواء المفاعل على جهازين لإغلاق المفاعل منفصلين عن بعضهما البعض.
- احتواء المفاعل على جهاز تبريد منخفض الضغط يستخدم لتبريد الحرارة خارج قلب المفاعل عند الحوادث.
- القدرة على تحميل المفاعل بالوقود مع استمرار عمل المفاعل .
- احتواء المفاعل على أقنية تزود بالوقود أفقية الشكل.

- يمكن الدخول لمبنى المفاعل للقيام بعمليات الصيانة مع استمرار عمل المفاعل.
- يمتلك المفاعل أنظمة تحكم تعمل بالحاسوب للتحكم بقدرة المفاعل والمحافظة على استقرار عمل المفاعل.

التحسينات التي أجريت على المفاعل EC6

- رفع القدرة التشغيلية للمفاعل إلى 740 ميغا واط حراري
- زيادة أنظمة الأمان الذاتية (Passive systems) في المفاعل
- تحسين بناء حاوية المفاعل
- إضافة نظام التخلص من الحرارة عند الحوادث كنظام أمان جديد
- تحديث أنظمة إطفاء الحريق في المفاعل المحقق للمعايير العالمية والكندية
- إحداث تعديلات تصميمية إضافية لزيادة إمكانية حماية البيئة والعاملين والسكان وجعل التعرض للإشعاع أقل ما يمكن تطبيقاً للمبدأ (ALARA)
- إضافة نظام إضافي للتزود بالماء والطاقة يعملان بطريقة مؤتمتة
- إضافة نظام لإغلاق المفاعل في حالة الحوادث لتحسين ميزة إغلاق المفاعل عند الحوادث
- إطالة عمر عمل المفاعل إلى ستين سنة
- رفع عامل الاستطاعة للمفاعل (Capacity factor) إلى 90%.

فلسفة الأمان المتبعة في المفاعل EC6

يعتمد الهدف الرئيسي للأمان في المفاعل EC6 على احتواء المواد المشعة ونواتج الانشطار داخل المفاعل لضمان أمن العاملين في المفاعل وضمان أمن السكان والبيئة خارج بناء المفاعل. يحقق هذا المفاعل تلك الأهداف من خلال احتوائه على الأنظمة التالية :

أنظمة التحكم بالمفاعل : التي تعمل على التحكم باستطاعة المفاعل وإغلاق المفاعل عند الضرورة .

أنظمة التخلص من الحرارة : التي تعمل على إزالة الحرارة المتولدة في المفاعل لمنع وصول الوقود إلى درجة الانصهار.

أنظمة احتواء المواد المشعة : لاحتواء المواد المشعة المتولدة في الوقود النووي أثناء الحوادث النووية.

أنظمة المراقبة : لمراقبة المفاعل والتأكد من أن كافة وسائل الأمان السابقة تعمل بشكل جيد وتحفز أجهزة إضافية للعمل و تقلل من خطر الحوادث في حال عدم عمل وسائل الأمان في المفاعل. حيث تعمل أجهزة الأمان النووية بدرجة عالية من الوثوقية بتطبيق المبادئ التالية :

- استخدام أجهزة ذات مواصفات نوعية عالية
- زيادة الاعتماد على أجهزة الأمان الذاتية
- استخدام حواجز متعددة للدفاع في العمق (Defence-in-depth) لمنع تحرير المواد المشعة خارج المفاعل
- تزويد المفاعل بمميزات أمان إضافية للتقليل من نتائج الحوادث النووية واحتوائها.

تتحقق صفة الأمان في المفاعل EC6 بواسطة أنظمة الأمان وأنظمة الأمان المساعدة وأنظمة البناء القوية التي تحقق معايير : التنوع والوثوقية والحماية ضد الحوادث الطبيعية مثل : الزلازل والحريق والفيضانات.

أنظمة الأمان الذاتي (Passive system) المستخدمة في المفاعل EC6

يحتوي المفاعل على مجموعة من أنظمة الأمان الذاتي هي :

أ - خزان ماء مرتفع في أعلى بناء المفاعل حيث يستخدم هذا الخزان لتزويد أنابيب المهدئ (Moderator vessels) واسطوانة المفاعل (Calandria) وحماية المفاعل بالماء للتخلص من الحرارة الزائدة عند الحوادث.

ب - بناء مفاعل مقاوم للزلازل يتضمن :

1 - بناء من الأسمنت المسلح يستطيع أن يتحمل حادثة التصادم بالطائرات.

- 2 - حاجز من الفولاذ للتقليل من تسرب المواد المشعة عند الحوادث.
- 3 - نظام لرش الماء من الخزان العلوي في حاوية المفاعل يستخدم عند الحوادث.
- 4 - نظام يعمل ذاتيا (Passive system) لإعادة تفاعل الهيدروجين للتقليل من تركيزه في هواء المفاعل أثناء حادثة فقدان المبرد من المفاعل (LOCA).

تطبيقات المفاعل EC6 :

يعتبر إنتاج الطاقة الكهربائية هو التطبيق الرئيسي للمفاعل EC6. بينما تتواصل الدراسات الحالية لاستخدام المفاعل في تدفئة المنازل وإزالة ملوحة مياه البحر وإنتاج الهيدروجين وإنتاج ومعالجة البخار.

أهداف التصميم الآمن للمفاعل EC6 :

- العمل بكل الإجراءات العملية لمنع وقوع الحوادث النووية في المفاعل والعمل على التقليل من آثارها عند وقوعها.
- العمل على أن تكون كمية الجرعة الإشعاعية تحت قيمة الجرعة المسموح بها عالميا من أجل كافة الحوادث المتوقعة حدوثها في المفاعل.
- جعل احتمال الحوادث المؤدية إلى تعرض إشعاعي خطر أقل ما يمكن .

تعزيز فكرة الدفاع في العمق (Defense-in-Depth) في المفاعل EC6 :

- لتعزيز فكرة الدفاع في العمق في المفاعل، فقد تم تزويد المفاعل EC6 بعدد من الحواجز المتعددة لمنع الحوادث والتقليل من آثارها (إن وقعت) على العاملين في المفاعل والسكان والبيئة المحيطة بالمفاعل. من أهم هذه الحواجز ما يلي :
- احتواء المفاعل على أنظمة أمان ذات وثوقية عالية لإغلاق وتبريد المفاعل وتبريد حاوية المفاعل عند وقوع الحوادث النووية.
- احتواء المفاعل على أنظمة أمان مساعدة لمساعدة أنظمة الأمان الرئيسية ولمساعدة الأنظمة التي تقلل من آثار الحوادث النووية إن وقعت.

– احتواء المفاعل عل أنظمة احتياطية لترحيل الحرارة من قلب المفاعل والتحكم بقدرة المفاعل.

– احتواء المفاعل على أجهزة لتصريف الحرارة ذاتية العمل (Passive systems) للحد من أثر الحوادث النووية عند وقوعها.

الحواجز المستخدمة في المفاعل EC6 لمنع تحرير نواتج الانشطار إلى الوسط الخارجي :

هناك عدة حواجز مستخدمة في المفاعل EC6 لمنع تحرير نواتج الانشطار إلى الوسط الخارجي هي :

– غلاف الوقود المحيط بالوقود النووي

– نظام نقل الحرارة من المفاعل (Heart Transport System, HTS)

– أنابيب اسطوانة المفاعل (Calandria tubes)

– المهدئ البارد منخفض الضغط

– بناء حاوية المفاعل الإسمنتي المسلح بالفولاذ

الميزات التصميمية للمفاعل للتعامل مع الحوادث النووية شديدة الخطورة :

زود المفاعل EC6 بعدة أنظمة لاحتواء الحوادث النووية شديدة الخطورة وهي :

– أنظمة متعددة للتخلص من الحرارة تعمل بصورة طبيعية .

– نظام تبريد عند الطوارئ لتبريد قلب المفاعل من خزان الماء المتوضع فوق بناء المفاعل.

– نظام تبريد ذاتي لحاوية المفاعل عن طريق رش الماء (Spray) إلى داخل حاوية المفاعل للتخفيض من الضغط داخل الحاوية عند الحوادث.

– نظام تبريد للتخلص من الحرارة عند الطوارئ (Emergency Heat Removal System, EHRS)

- نظام لحقن الماء بالمفاعل عند الطوارئ
- استخدام المهدئ لترحيل الحرارة من قلب المفاعل
- نظام يعمل ذاتياً لإعادة اتحاد الهيدروجين والتقليل من تركيزه في الهواء ومنع انفجاره.

د. قاسم خطاب

رئيس قسم الهندسة النووية

هيئة الطاقة الذرية السورية

kkhattb@aec.org.sy

References

- (1) International Atomic Energy Agency, Advance in heavy water reactor technology, , IAEA-TECDOC-984,1997.
- (2) International Atomic Energy Agency, introduction of small and medium reactors in developing countries, IAEA-TECDOC-999,1998.
- (3) International Atomic Energy Agency, Status if innovative small and medium sized reactor designs, IAEA-TECDOC-1485, 2006.