الطاقة النووية ... وإنتاج الطاقة

الأستاذ الدكتور / ممدوح فتحى عبد الصبور

وحدة تلوث المياه والتربة - الطاقة الذرية - مصر

يجابه العالم اليوم موقفاً صعباً فالإسراف فى استخدام الطاقة فى كل مكان يهدد مصادر الطاقة التقليدية بالنضوب خلال بضع عشرات من السنين ، وكذلك فإن اعتماد بعض الدول اعتماداً زائداً على مصادر الطاقة المستوردة يهدد نمو هذه الدول بشكل خطير ، ويؤثر على كيانها الاقتصادى واستغلال سياستها .

ومن ناحية أخرى يضع الوقود الأحفورى المجتمع البشرى أمام معضلة ، فإحراق الفحم والنفط والغاز الطبيعى فى جميع أنحاء العالم يزودنا بنحو ٨٤% من الطاقة التى نستهلكها، ولكن الغازات التى تنبعث أثناء الاحتراق تفسد البيئة إلى حد تغيير المناخ على الأرض وتهدد صلاحية الأرض للسكن فى المستقبل، كما أصبحت مشكلة الأمطار الحمضية ، ودخان المدن وارتفاع حرارة الأرض بسبب زيادة مستوى ثانى أكسيد الكربون وغيره من الغازات المسماة بالغازات الدفيئة فى الغلاف الجوى أكبر من المشكلات البيئية ، والتى يبحث العلماء عن تقنيات جديدة لتخفيف آثارها . والجدير بالذكر أنه إذا لم يضطرنا إجهاد البيئة إلى التحول نحو أنواع أخرى من الوقود لإنتاج الطاقة فإن المتاح من الوقود الأحفورى سيفرض مثل هذا التحول فى نهاية الأمر .

ومع تطور تقنيات المفاعلات النووية فى أوائل الخمسينيات لقيت الطاقة النووية ترحيباً باعتبارها الحل البديل لمشكلات الطاقة فى العالم ، ويرى المؤيدون لاستغلال الطاقة النووية أن التقدم العلمى والتكنولوجى وارتفاع مستوى معيشة الشعوب سيفرض علينا أن نبحث عن مصادر جديدة للطاقة ، ومع زيادة عدد المفاعلات تزايدت احتمالات الحوادث النووية واتهمت الطاقة النووية بأنها الطريقة الأكثر خطورة ، وزادت المعارضة لها خصوصاً بعد حادثة ثرى مايلز فى مارس ١٩٧٩ بالولايات المتحدة الأمريكية ، وحادثة تشرنوبل فى أبريل ١٩٨٦ بالاتحاد السوفيتى السابق مما أدى إلى توقف بناء المفاعلات فى عدة دول . ويرى المعارضون لاستخدام الطاقة النووية أن مستقبل هذه الطاقة مازال مشكوكاً فيه لأسباب متعددة

منها ما يتعلق ببعض آثارها الضارة على البيئة المحيطة بها مثل المخاطر التى قد تنشأ عن تسرب الإشعاعات من المفاعلات أو التلوث الحرارى للمجارى المائية ومخاطر التلوث الناشئ عن المخلفات النووية المشعة . والجدول التالى يبين عدد المفاعلات النووية العاملة حالياً والمستخدمة فى توليد الكهرباء فى مختلف بلدان العالم والنسبة المئوية لتوليد الكهرباء فيها ، كذلك مشاريع المفاعلات تحت الإنشاء فى التسعينيات .

جدول (١) المفاعلات النووية وإنتاج الطاقة الكهربائية بالميجاوات (المصدر IAEA فيينا)

	مفاعلات عاملة	كهرباء فولت (Mwt)	النسبة المئوية لتوليد الكهرباء	مفاعلات تحت الإنشاء
كندا	١٨	١٢١٨٥	١٥,٦	٤
كوبا	-	-	-	٢
المكسيك	١	٦٤٥	-	١
الولايات المتحدة	١١٠	٩٩٣٣١	١٩,١	٤
الأرجنتين	٢	٩٣٥	١١,٤	١
البرازيل	١	٦٢٦	٧	١
بلجيكا	٧	٥٥٠٠	٦٠,٨	-
بلغاريا	٥	٢٥٨٥	٣٢,٩	٢
ألمانيا	٣٠	٢٤٨١٨	٤٥,٢	٦
تشبكو سلوفاكيا	٨	٣٢٦٤	٢٧,٦	٨
فرنسا	٥٥	٥٢٥٨٨	٧٤,٦	٩
فنلندا	٤	٢٣١٠	٣٥,٤	-
المجر	٤	١٦٤٥	٤٩,٨	-
إيطاليا	٢	١١٢٠	-	-
هولندا	٢	٥٠٨	٥,٤	-
رومانيا	-	-	-	٥
أسبانيا	١٠	٧٥٤٤	٣٨,٤	-
السويد	١٢	٩٨١٧	٤٥,١	-
سويسرا	٥	٢٩٥٢	٤١,٦	-
إنجلترا	٣٩	١١٢٤٢	٢١,٧	١
يوغوسلافيا	١	٦٣٢	٥,٩	-
الصين	-	-	-	٣
الهند	٧	١٣٧٤	١,٦	٧
إيران	-	-	-	٢
اليابان	٣٩	٢٩٣٠٠	٢٧,٨	١٢
باكستان	١	١٢٥	٢	-
كوريا الجنوبية	٩	٧٢٢٠	٥٠,٢	٢
تايوان	٦	٤٩٢٤	٣٥,٢	-
روسيا	٤٦	٣٤٢٣٠	١٢,٣	٢٦
جنوب أفريقيا	٢	١٨٤٢	٧,٤	-

الانشطار النووى والمفاعلات النووية :

يعتبر الانشطار النووى من الوسائل الأساسية للحصول على الطاقة النووية ، والانشطار النووى ينتج عن اصطدام نيوترون متحرك بسرعة مناسبة بنواة ذرة ثقيلة قابلة للانشطار فتلتحم به مكونة نواة غير مستقرة تنقسم مباشرةً إلى نواتى عنصرين أقل وزناً " يطلق عليهما نواتج الانشطار " ، ويصحب ذلك انطلاق عدد من النيوترونات السريعة تتراوح بين ٢-٣ نيوترونات .

كما تتولد كمية هائلة من الطاقة نتيجة لفرق الكتلة بين النواة ونواتج الانشطار ، وتتسبب النيوترونات الجديدة بدورها فى انشطار نويات أخرى ثقيلة مما يؤدى إلى تولد كميات أخرى من الطاقة مع انطلاق نيوترونات أخرى أكثر عدداً ، وهكذا تتوالى الانشطارات النووية ، وهذا ما يسمى بالتفاعل النووى المتسلسل ، ولا ترجع أهمية الانشطار النووى إلى كمية الطاقة الهائلة المتولدة منه فقط ، وإنما إلى استمرارية توليد هذه الطاقة نتيجة لهذا التفاعل المتسلسل ، ويعتبر اليورانيوم-٢٣٥ من أهم النظائر التى يعتمد عليها فى الحصول على الطاقة عن طريق الانشطار النووى .

تعتمد معظم المفاعلات النووية على اليورانيوم كوقود لها ، واليورانيوم الطبيعى يحتوى على نسبة صغيرة من اليورانيوم -٢٣٥ القابل للانشطار تبلغ (٠,٧١%) ، أما الباقى فيشمل نظير اليورانيوم-٢٣٨ ، ونسبة ضئيلة جداً من نظير اليورانيوم-٢٣٤ ، وفى معظم أنواع المفاعلات فإن استخدام اليورانيوم الطبيعى لا يتحقق معه استمرار التفاعل المتسلسل نظراً لضآلة نسبة اليورانيوم-٢٣٥ به ، ويلزم زيادة نسبة اليورانيوم-٢٣٥ به عن نسبته فى اليورانيوم الطبيعى ، ويطلق عليه اليورانيوم المثرى .

وترجع أهمية وجود نظير اليورانيوم-٢٣٨ فى وقود اليورانيوم إلى أنه بامتصاصه للنيوترونات يمكن أن ينتج عنه نظيرى البلوتونيوم-٢٣٩ والبلوتونيوم-٢٤١ القابلين للانشطار ، واللذين يستخدمان كمصدر لتوليد الطاقة ، وهذه العملية المتمثلة فى إنتاج عناصر قابلة للانشطار من عناصر أخرى غير قابلة للانشطار يطلق عليها عملية التوليد .

وبالتحكم فى معدل الانشطار المتسلسل يمكن التحكم فى معدل الطاقة الحرارية المتولدة منه بالتالى التحكم فى معدل النيوترونات المتاحة للانشطار ، ويتم ذلك باستخدام ما يطلق عليه قضبان التحكم ، وتصنع من مواد لها خاصية الامتصاص العالى للنيوترونات مثل البورون والكادميوم ، وعليه فإنه يمكن زيادة معدل امتصاص النيوترونات بإدخال هذه

القضبان بين وحدات الوقود ، وبذلك يقل معدل الانشطار المتسلسل أما تحريكها خارج وحدات الوقود فإنه يقلل من معدل امتصاص النيوترونات وبالتالى يزداد معدل الانشطار ، وبهذه الطريقة يمكن التحكم فى معدل الطاقة الحرارية المتولدة من الانشطار .

والمفاعل النووى عبارة عن وعاء معدنى يوجد بداخله ما يسمى بقلب المفاعل المكون من الوقود النووى وقضبان التحكم بالإضافة إلى مكونات المفاعل الأخرى. ويطلق على بعض أنواع المفاعلات اسم المفاعلات الحرارية ، وترجع هذه التسمية إلى اعتماد هذه المفاعلات على النيوترونات الحرارية لاحداث الانشطار ، ويتم ذلك عن طريق إتاحة الفرصة لاصطدام نويات اليورانيوم-٢٣٥ عند انطلاقها بنويات مادة أخرى خفيفة يطلق عليها المهدئ ، وعادة ما يستعمل الماء العادى أو الماء الثقيل أو الجرافيت كمهدئ .

وتستغل الطاقة الحرارية المتولدة من الوقود فى توليد البخار اللازم لإنتاج الكهربية، ويتم ذلك بإمرار سائل أو غاز فى قلب المفاعل يطلق عليه المبرد، ويمتص المبرد الحرارة المتولدة فى الوقود النووى فترتفع درجة حرارته ويمرر بعد ذلك فى مواسير داخل ما يسمى مولد البخار المستخدم فى معظم أنواع المحطات ، وفيه تنتقل حرارة المبرد إلى المياه المحيطة بالمواسير مما يؤدى إلى توليد البخار الذى يقوم بإدارة توربينات تدير بدورها المولد الكهربى ، أما المبرد فيعود بعد أن يفقد جزء كبير من حرارته أثناء عملية التبادل الحرارى مولداً البخار إلى قلب المفاعل وتتكرر الدورة مرة أخرى ، وتسمى دورة مبرد الوقود هذه بدورة التبريد الابتدائية .

وتحدد طريقة توليد البخار المستخدم فى تغذية التوربينات التى تقوم بدورها بتشغيل مولد الكهرباء ، نوعية المحطة النووية فقد يتولد هذا البخار مباشرة داخل قلب المفاعل ، كما فى حالة مفاعلات الماء المغلى أو يتولد عن طريق وسيط يسمى مولد البخار كما فى حالة مفاعلات الماء المضغوط .

١ـ مفاعلات الماء العادى المضغوط :

يعتبر هذا النوع من المفاعلات من أكثر المفاعلات شيوعاً فى العالم لتوليد الكهرباء، كما يستخدم فى السفن والغواصات التى تدار بالطاقة النووية ، ويتكون المفاعل من :

١-قلب المفاعل الذى يوجد به الوقود النووى على شكل قضبان ، تسمى بقضبان الوقود النووى كما يوجد به عدد من قضبان التحكم للسيطرة على التفاعل المتسلسل ، والوقود المستخدم فى معظم مفاعلات الماء المضغوط يصنع من ثانى أكسيد اليورانيوم المثرى ، والذى يحتوى على نسبة من نظير اليورانيوم-٢٣٥ تتراوح بين ٢-٣% ، ويصنع الوقود على شكل اسطوانات صغيرة يبلغ طولها حوالى ١ سم وقطرها ٠,٨سم ، وتعبأ هذه الأسطوانات من أنابيب طويلة تسمى بغلاف الوقود لتكون ما يسمى بعمود الوقود التى يبلغ طولها ٤ أمتار ، ويصنع غلاف الوقود عادة من سبيكة الزركونيوم أو الصلب غير القابل للصداء لما تتميز به هذه المواد من مقدرة على توصيل الحرارة ومقاومة عالية للتآكل والصدأ ، وأيضاً لقلة قابليتها لامتصاص النيوترونات ، ويجمع عدد من أعمدة الوقود باستخدام شبكة معدنية مربعة ليكونوا ما يسمى بحزمة الوقود ، وتسمح هذه الشبكة المعدنية بمرور المبرد بين حزم الوقود وملامساً لأعمدة الوقود ، وترتبط قدرة المفاعل بعدد حزم الوقود الموجودة به (شكل ١) .

شكل (١) : رسم توضيحى لمفاعل الماء المضغوط

٢- وعاء الاحتواء يحتوى على قلب المفاعل والماء الذى يستخدم فى تهدئة النيترونات الداخلة فى التفاعل وفى التخلص من الحرارة الناتجة عن عملية الانشطار

هذا الوعاء مصنوع من الصلب القوى (سمكه حوالى ٢٠-٣٠ سم) ، وهو مغطى من الداخل بطبقة من سبيكة غير قابلة للصداء .

٣- نظام التبريد ونقل الطاقة داخل قلب المفاعل يقوم على ٣ دوائر متتالية هى :-

أ- **الدائرة الابتدائية :** تتكون من ثلاث دوائر تبريد متماثلة ، وذلك فى حالة المفاعلات قدره ٩٠٠ ميجاوات ومن ٤ دوائر تبريد متماثلة فى حالة المفاعلات قدرة ١٣٠٠ ميجاوات ، وتمر كل دائرة منها عبر وعاء الاحتواء ، وتنقل الحرارة المولدة داخل قلب المفاعل إلى المبادلات الحرارية المسماة بمولدات البخار التى يتم بواسطتها أول نقل للطاقة الحرارية عن طريق هذه الدوائر المغلقة ، ويوجد ضابط للضغط يعمل على التحكم فى ضغط الدائرة، ويستخدم الماء العادى كمبرد ومهدئ فى هذا النوع من المفاعلات ، ولا يسمح له بالغليان داخل دورة التبريد الابتدائية رغم أن درجة حرارته تبلغ حوالى ٣٠٠ درجة مئوية مما يستلزم معه حفظ المبرد تحت ضغط عال يصل إلى حوالى ١٦٠ ضغط جوى.

ب- **الدائرة الثانوية :** هذه الدائرة تعمل على امتصاص الحرارة الموجودة فى الدائرة الأولى عن طريق المبادلات الحرارية ونقلها على شكل بخار فى اتجاه التوربينات وهذا يمثل النقل الثانى للطاقة (دائرة مغلقة لا تحتوى على مواد مشعة) .

ج- **دائرة ثالثة للتبريد :** تحتوى على مكثف يعمل على استعادة الحرارة الكامنة فى البخار الخارج من التوربينات ويبرد هذا المكثف إما باستخدام أبراج التبريد أو بالمياه فى حالة توفير مصدر المياه القريب من المحطة النووية (نهر أو بحر) ، ولا يحتوى ماء تبريد المكثف على أى مواد مشعة .

٢- مفاعلات الماء المغلى :

تتكون من جزئين هما :

أ- **المفاعل :** يحتوى قلب المفاعل على الوقود بحيث يسمح بمرور المبرد ، وهو الماء العادى خلال قضبان الوقود تحت ضغط عال (٧٠ ضغط جوى) ، وتحت هذا الضغط يتم غليان الماء ، ويتحول إلى بخار داخل المفاعل ، ويتم فصل البخار عن الماء ثم تجفيفه

بواسطة فاصل البخار ومجففى البخار الموجودين فى الجزء العلوى من المفاعل للوصول به إلى الخواص المناسبة لتشغيل التوربينة (٧٠ ضغط جوى ، ٠,٢٥% نسبة رطوبة) ، ويتم التحكم فى التفاعل النووى بواسطة قضبان التحكم على شكل ألواح متقاطعة (صليبية) يتم إدخالها من أسفل المفاعل وتتخلل قلب المفاعل ويتم التحكم فيها أوتوماتيكياً أو يدوياً . والوقود عبارة عن حزم بكل منها عدد من قضبان أكسيد اليورانيوم المثرى المغلف بسبيكة من الذركونيوم ، ويصل معدل احتراق هذا الوقود إلى ٢٧ ألف ميجاوات يوم/طن يورانيوم ، ويتم إعادة شحن الوقود سنوياً بعد إيقاف المفاعل عن العمل ويتميز هذا النوع من المفاعلات بوجود مضخات نفاثة داخله تقوم بعمل مضخة التبريد .

ب- دائرة التبريد : هى دائرة مباشرة للتبريد وفيها يتجه البخار الناتج من المفاعل نحو التوربينة البخارية مباشرة مولداً قوة الدوران لمولد الكهرباء ثم يمر فى المكثف ، ويتحول إلى مياه تعود مرة أخرى إلى المفاعل ، وتتميز هذه المفاعلات بعدم حاجتها إلى استخدام مولد بخار ، كما أن المفاعل يعمل عند ضغط أقل نسبياً من مفاعلات الماء المضغوط ، إلا أن مفاعلات الماء المضغوط تتميز بوجود فصل ماء دورة التبريد الأولية المعرضة للإشعاعات عن دورة توليد البخار المتجه إلى التوربينة مما يعتبر أكثر أماناً .

٣- مفاعلات الجرافيت المبردة بالماء :

يستخدم الجرافيت فى هذه الأنواع من المفاعلات كمهدئ للنيوترونات ، ويستخدم الماء العادى كمبرد ويتكون قلب المفاعل من تجمعات من كتل الجرافيت بداخلها أنابيب تسمى بأنابيب الضغط يوجد بداخلها أعمدة الوقود النووى الذى يمر حوله ، وداخل هذه الأنابيب ماء التبريد الذى يتحول بدوره إلى بخار يخرج إلى التوربينات مباشرة .

ومما يذكر أن مفاعل تشيرنوبل الذى وقعت به الحادثة النووية فى ٢٦ أبريل ١٩٨٦ ونتج عنه تسرب إشعاعى خطير هو من هذا النوع من المفاعلات ، ولا يوجد مثل هذه المفاعلات إلا فى الاتحاد السوفيتى (سابقاً) ، ويختلف عن مفاعلات الماء العادى المضغوط ومفاعلات الماء المغلى فى عدم وجود وعاء احتواء خرسانى يحيط به ويمكوناته دورة التبريد

بحيث يتحمل الضغط ودرجات الحرارة فى حالة الحوادث الطارئة ، ويمنع بذلك تسرب الإشعاع للبيئة .

٤ـ مفاعلات الماء الثقيل :

يستخدم الماء الثقيل كمهدئ والماء الثقيل صورة من صور الماء يحل فيها الديوتيريوم محل الهيدروجين ، ويتميز الماء الثقيل بانخفاض قيمة امتصاصه للنيوترونات مما يساعد على زيادة عدد النيوترونات المتاحة لإحداث الانشطار ، وبالتالى يمكن استخدام اليورانيوم الطبيعى مباشرة دون الحاجة إلى زيادة نسبة اليورانيوم-٢٣٥ .

ويستخدم الماء العادى أو الثقيل كمبرد ، ويمر المبرد على أعمدة الوقود فى أنابيب مجوفة تسمى أنابيب الضغط وتكون محاطة بماء المهدئ ، وبذلك فإن المبرد يحفظ تحت ضغط عال داخل هذه الأنابيب دون الحاجة لاستخدام وعاء ضغط . أما المهدئ فإن درجة حرارته تكون أقل من درجة حرارة المبرد لذا فإنه عادة ما يحفظ عند الضغط الجوى ، ويتميز هذا المفاعل بإمكانية إعادة شحنة بالوقود دون الحاجة إلى إيقافه .

٥ـ مفاعلات التبريد الغازى :

بدأ استخدام وتطوير مفاعلات التبريد الغازى فى الولايات المتحدة الأمريكية أثناء الحرب العالمية الثانية ، وذلك لتحويل اليورانيوم-٢٣٨ إلى البلوتونيوم-٢٣٩، والذى يستخدم فى الأغراض العسكرية ، ويعتبر هذا النوع من المفاعلات نقطة بدء البرامج النووية لكثير من الدول مثل فرنسا وبريطانيا ، ومن أهم الأنواع المعروفة من مفاعلات التبريد الغازى هى :

أ- مفاعلات الماجنوكس .

ب- مفاعلات التبريد الغازى المتقدمة .

جـ- مفاعلات التبريد الغازى عالية الحرارة .

وفى مفاعلات الماجنوكس يستخدم اليورانيوم الطبيعى كوقود ، ويصنع على شكل أعمدة طولها حوالى متر وقطرها ٢,٥سم ، وترجع تسمية هذا النوع من المفاعلات بالماجنوكس إلى استخدامه لسبيكة الماجنوكس كمادة لأغلفة الوقود ، وتتكون السبيكة من الماغنسيوم والألومنيوم والبريليوم والنحاس ، وتتميز بأنها لا تتآكل بتأثير ثانى أكسيد الكربون

المستخدم كمبرد ، ويستخدم الجرافيت كمهدئ ، ويكون على شكل كتل بها قنوات تدخل بها أعمدة الوقود وتمر بها أيضاً أعمدة التحكم من الصلب المضاف إليه بورون ، ويبلغ طولها حوالى ٨-١٠ أمتار ، وقطرها حوالى ٤-٥سم .

أما فى مفاعلات التبريد الغازى المتقدم فيستخدم أكسيد اليورانيوم المثرى كوقود ويضع الوقود على شكل اسطوانات قصيرة مجوفة من الداخل وتعبأ هذه الاسطوانات فى أغلفة مضلعة مصنوعة من الصلب الغير قابل للصدأ المضاف إليه نسبة من الكروم والنيوبيوم ، ويتميز هذا النوع من المفاعلات بإمكانية شحنه بالوقود أثناء التشغيل دون الحاجة إلى إيقافه .

أما مفاعلات التبريد الغازى عالية الحرارة فيستخدم اليورانيوم الذى يحتوى على نسبة عالية جداً من اليورانيوم-٢٣٥ مخلوطاً مع الثوريوم-٢٣٢ كوقود ، وترجع أهمية استخدام الثوريوم إلى تحوله إلى نظير اليورانيوم-٢٣٣ عند امتصاصه للنيوترونات ، ولأن نظير اليورانيوم-٢٣٣ قابل للانشطار ، فإن تكونه بالمفاعل يعتبر إضافة للوقود الأصلى ويضع الوقود على شكل اسطوانات قصيرة من كربيد اليورانيوم والثوريوم ، مغلفة بالجرافيت ، والذى يستخدم كمهدئ .

ويستخدم غاز الهيليوم كمبرد وهو يتميز بأنه غاز خامل لا يتفاعل مع المهدئ مهما ارتفعت درجة حرارته كما أنه لا يمتص النيوترونات وبالتالى لا يتحول إلى غاز مشع ، ومن الجدير بالذكر أن إنشاء هذا النوع من المفاعلات يعتبر عالى التكاليف كما أن معدل احتراق الوقود الذى يستخدم به منخفض .

٦- المفاعلات المولدة السريعة :

يعتمد هذا النوع فى بداية تشغيله على اليورانيوم كوقود ثم يحل محله تدريجياً البلوتونيوم المتكون فى المفاعل أثناء التشغيل حتى يكون الوقود النهائى للمفاعل هو البلوتونيوم فقط مع اليورانيوم الطبيعى ، ويحاط قلب المفاعل فى هذا النوع من المفاعلات أيضاً بغلاف من اليورانيوم الطبيعى أو المستنفذ (الذى سبق استخدامه فى تشغيل مفاعلات أخرى) ، وترجع أهمية استخدام اليورانيوم الطبيعى أو المستنفذ إلى قدرته المميزة على توليد البلوتونيوم ، وبالتالى توفير وقود إضافى أثناء التشغيل وتعويض احتراق الوقود الأصلى ومن هنا جاءت تسمية هذه المفاعلات بالمفاعلات المولدة ، وحيث أن هذه المفاعلات تعتمد فى

توليد الطاقة على الانشطار النووى بواسطة النيوترونات المنطلقة عند سرعات عالية، فإنها لا تحتاج إلى استخدام المهدئ مثل المفاعلات الحرارية السابق ذكرها.

ومن أهم مزايا هذا النوع من المفاعلات أنه يستخدم الوقود بكفاءة تزيد حوالى ٦٠ مرة عن الأنواع الأخرى ، وبالتالى فإن استخدامها يساعد على ترشيد استخدام الوقود النووى ويقلل من معدل استهلاك الاحتياطى العالمى من اليورانيوم ، ومن أهم أنواع المفاعلات السريعة المولدة هى المفاعلات السريعة المبردة بالمعدن المنصهر .

وفى المفاعل السريع المبرد بالمعدن المنصهر يكون الوقود خليط من أكاسيد البلوتونيوم واليورانيوم مصنعه على شكل أعمدة موضوعة فى أغلفة من الصلب الذى لا يصدأ ، وتجمع قضبان الوقود معاً لتكون حزمة الوقود ذات الشكل السداسى ، ويستخدم الصوديوم المنصهر كمبرد ، وذلك لأن له مقدرة عالية على توصيل الحرارة ، ويحفظ الصوديوم تحت الضغط العادى ، وذلك لأنه لا يغلى فى درجات الحرارة العالية التى يصل إليها قلب المفاعل (حوالى ٦٥٠ درجة مئوية) ، ولمنع احتمال تلامس الصوديوم المشع مع الماء فإنه يمرر إلى دائرة تبريد ثانية تبرد عادة بالصوديوم الذى يتجه إلى مولد البخار لتوليد البخار .

حدود الطاقة النووية وإنتاج الطاقة الكهربية :

وفقاً لبيانات الوكالة الدولية للطاقة الذرية فإن نسبة الكهرباء المولدة بواسطة الطاقة النووية تقدر بحوالى ١٦% من إنتاج الكهرباء فى العالم (٤٠٠ جيكا وات) ، وتحتاج إلى ٣٠ طن يورانيوم-٢٣٥ المخصب بنسبة ٣% لتوليد جيكا وات واحد على مدار سنة واحدة فى مفاعل الماء الخفيف ، وقد سمى هذا المفاعل بهذا الاسم ؛ لأن الماء العادى يستخدم فيه كمبرد ، كما يحول إلى بخار بواسطة الحرارة المتولدة من الانشطار النووى فى المفاعل ، وحيث أن ٧٥% من المفاعلات العاملة فى العالم حالياً هى من مفاعلات الماء الخفيف ، وإذا حدث ما هو محتمل وتم التوصل إلى تحسين أداء قلب (لب) المفاعل بنسبة ١٥% فإن ذلك يعنى أن عمر عناصر الوقود ستصبح أطول ، وعندئذٍ سنحتاج نحو ٢٠ طن/سنة من اليورانيوم المخصب (يساوى ١٦٠ طن من اليورانيوم غير المخصب لكل واحد جيكا وات/سنة) ، وإذا كانت هذه الافتراضات المتحفظة صحيحة فإن ما بين ستة إلى سبعة ملايين طن من اليورانيوم – هو ما يعادل الإمداد العالمى المقدر حالياً – وهو ما يلزم لتلبية الاحتياجات

الخاصة لتوليد الكهرباء خلال القرن القادم ، وإذا افترضنا أن الوقود النووى المستهلك لا يعاد استخدامه فإن نفايات الوقود النووى المستهلك المشعة سوف تتراكم . وببساطة فإن إنتاج ٤٠٠ جيكا وات سوف يؤدى إلى تراكم ٨٠٠٠ طن نفايات ذرية .

إن تخزين النفايات بهدف التخلص منها عملية غير معقدة تقنياً ، غير أن المعارضة الشعبية لتداول المواد المشعة وتصريفها تحدث دائماً مشكلات قانونية واجتماعية لها أهميتها وإضافة إلى استهلاك مخزون العالم من اليورانيوم وإنتاج جبال من عناصر الوقود المشع فى القرن القادم ، فإن تقنية مفاعلات الماء الخفيف لن تنتج إلا كمية قليلة نسبياً من الطاقة الكهربائية إذا ما قورنت بمصادر الطاقة الحرارية (نفط وغاز) حيث تقدر فقط بنسبة ٠,٦% من إنتاج الكهرباء ، ومع ذلك فإن المفعول السلبى الخطير لاحترار الأرض يعطى حجة قوية نحو المزيد من استخدام الطاقة النووية خاصة إذا ما أمكن حل مسألتى السلامة والنفايات الذرية ، وينادى العلماء بتخفيض سنوى لإنتاج ثانى أكسيد الكربون بمعدل ٢٠% بحيث يهبط من ٦ بلايين طن من الكربون سنوياً إلى ٤,٨ بليون طن ، ويكون ذلك بزيادة كفاءة استخدام الطاقة ، والتحول من استخدام الفحم إلى استخدام الغاز الطبيعى ، ومع اعتماد أكبر على الطاقة الشمسية ، وعلى احتراق الكتلة الحيوية وما تبقى من احتياجات يترك للطاقة النووية .

الطاقة النووية وسلامة البيئة :

مع بداية الصناعة النووية فى الخمسينيات من القرن الحالى أوليت مسائل السلامة النووية أهمية خاصة إلا أن مفهوم السلامة قد تغير فالتوجه الغالب الآن هو تبنى مصطلح التحليل الاحتمالى للمجازفة ، وأصبح تحليلاً مقارناً فمثلاً المقارنات بين تصميم المفاعلات النووية قادت بنجاح إلى تشخيص العيوب فيها ومن ثم إلى تصحيحها ، ومثل هذه التحاليل حساسة جداً ومعقدة ، وبتطبيق هذا الأسلوب فى التحليل على تصميم المفاعلات النووية الحديثة .

ويقدر المهندسون أن انصهاراً رئيسياً لقلب المفاعل يمكن أن يقع مرة فقط كل عشرون ألف سنة ، وإذا حدث أن انصهر قلب المفاعل فإن احتمال انطلاق النشاط الإشعاعى من المفاعل يمكن تخفيضه إلى أبعد من ذلك إذا ما صممت حاوية جديدة تحيط بالمفاعل ، والمقارنة بين حادث مفاعل تشرنوبل وحادث جزيرة ثرى مايل تشير إلى مدى أهمية وجود

حاوية للمفاعل حيث لعبت الحاوية فى حالة مفاعل ثرى مايل دوراً مهماً فى الحد من تسرب النشاط الإشعاعى ، إذ لم يتسرب منه إلا القليل فى يوم وقوع الحادث (١٩٧٩/٣/٢٨) ، ولكن فى يوم ١٩٨٦/٤/٢٦ عندما وقع حادث تشرنوبل ، انطلق تلوث إشعاعى هائل بسبب عدم وجود حاوية إلى الغلاف الجوى .

إن تقانة كفاءة الوقود المتوفرة حالياً تتمثل فى المفاعلات المولدة السريعة ، وقد سميت كذلك لأنها تنتج وقوداً أكثر مما تستهلك ، وذلك بتحويل اليورانيوم غير الانشطارى إلى بلوتونيوم انشطارى ، وهذه المفاعلات تستخلص طاقة أعلى ١٠٠ مرة من مفاعلات الماء الخفيف .

استخدام الطاقة النووية Nuclear Power

تستخدم الطاقة النووية فى العديد من بلدان العالم لإنتاج الكهرباء- بتكلفة تنافسية - بالمقارنة مع محطات القوى الكهربائية المولدة من بدائل الوقود الحفرى (البترول- الفحم - الغاز الطبيعى ... الخ) كما أنها تعتبر الوسيلة النظيفة إلى حد ما من وجهة نظر التلوث البيئى .

وبالنسبة لإزالة ملوحة المياه فهى تعد من مصادر الطاقة الحرارية التى يمكن استخدامها فى تشغيل تقنيات إزالة الملوحة - سالفة الذكر - المعتمدة على طرق التبخير بمختلف أنواعها .

وفى هذا المجال تستخدم مفاعلات القوى ثنائية الغرض Dual purpose power reactors وذلك لإنتاج الكهرباء وإزالة الملوحة فى محطة واحدة - الأمر الذى يعمل على خفض تكاليف إنتاج كل من الطاقة الكهربائية والمياه العذبة المزالة الملوحة .

ومن هذا المنطلق - فإننا نود أن نذكر أنفسنا بالماضى القريب - حيث تضمنت الخطة القومية المصرية - منذ أوائل الستينيات من هذا القرن - إنشاء مفاعل القوى - ثنائى الغرض - لإنتاج الكهرباء بقوة وملحق به محطة لإزالة ملوحة مياه البحر بقدر إنتاجية ٢٠٠٠٠ متر مكعب/يوم بمنطقة سيدى كرير " بالساحل الشمالى الغربى - وملحق بها مزرعة تجريبية بمساحة ١٠٠٠٠ فدان لدراسة اقتصاديات استخدام المياه المزالة الملوحة وتطبيق تكنولوجيا الرى الحديثة ... الخ ، وقد تمت الدراسات اللازمة لذلك ، والإعلان عن التنفيذ فى

مناقصة عالمية – ورست المناقصة بالفعل على إحدى الشركات – ولكن للأسف الشديد توقف كـــل ذلـــك نظـــراً لظـــروف سياســـية دوليـــة اقتصـــادية – وتلـــك خســـارة لا يعلم مداها إلا الله . (الجبيلى وآخرين ١٩٧٢) .

وعلى أية حال – فإن الحاجة إلى استخدام المياه المزالة الملوحة – أحد المصادر الهامة للموارد المائية – مازالت مطلوبة بالحاح لسد الفجوة المائية – تحت الظروف المصرية الحالية والمستقبلية – الأمر الذى يحتم سرعة اقتحام هذا المجال . وبأى التقنيات الممكنة – وقد أصبحت ضرورة ملحة لا مناص منها .

اقتصاديات إزالة الملوحة Desalination Economics

إن التقديرات الاقتصادية لإنتاج المياه العذبة – بطرق إزالة الملوحة تعتمد على عوامل متعددة من أهمها :

١– مدى الحاجة إلى المياه المزالة الملوحة وخاصة فى حالات ندرة توافر المياه السطحية العذبة .

٢– تكاليف نقل المياه السطحية الطبيعية إن وجدت ورفعها إلى المناطق الزراعية أو الصناعية التى قد لا تتوافر إلا على مسطحات ترتفع كثيراً عن مستوى المياه السطحية الطبيعية .

٣– زيادة تكاليف معاملة وتنقية مياه الصرف الصحى أو الزراعى إن وجدت بالمقارنة بتكاليف إنتاج المياه بوحدات إزالة الملوحة .

٤– القدرة الإنتاجية لوحدات إزالة الملوحة إذ كلما زادت القدرة الإنتاجية كلما انخفضت تكاليف إنتاج المتر المكعب من المياه المزالة الملوحة .

٥– تتوقف تكاليف إنتاج المياه المزالة الملوحة على نوعية المياه المراد اعذابها ودرجة ملوحتها ، وكذلك على تقنية إزالة الملوحة المستخدمة .

فعلى سبيل المثال : إن تكاليف إزالة ملوحة مياه البحر تفوق من ٣–٥ مرات تكاليف إزالة ملوحة المياه الخضماء "Brackish Water" ، كما أن استخدام تقنيات الأغشية أقل بكثير من استخدام تقنيات الطاقة الحرارية أو النووية. ووفقاً لتقديرات "Wangnick, Klaus, 1990 (IDA)" بالولايات المتحدة الأمريكية ، فإن تكاليف إنتاج المياه

العذبة من مياه البحر تقدر بحوالى من ١-٤ دولار للمتر المكعب من وحدات إنتاج تقدر من ٤٠٠٠ إلى ٢٠٠٠٠ متر مكعب/يوم، بينما قدرت تكاليف إنتاج المياه العذبة من المياه الخضماء من ٠,٢٥ إلى ٠,٦٠ دولار للمتر المكعب من وحدات إنتاج تقدر من ٤٠٠٠ إلى ٤٠٠٠٠ متر مكعب/يوم .

وخلاصة القول فى مجال الاقتصاديات فإنه ليست العبرة بالقيمة المالية من حيث تكاليف إنتاج وحدات المياه العذبة (بأى من العملات المحلية أو الأجنبية). ولكن العبرة بمدى الحاجة إلى هذه المياه المزالة الملوحة – كمصدر مياه لابد منه لسد فجوات العجز فى الموارد المائية الحالية والمستقبلية .

وهناك تقنيات نووية أخرى لم تخط بعد عتبة الجدوى العملية تحمل آمالاً ووعوداً كبيرة فى إنتاج الطاقة أهمها الاندماج النووى ، والاندماج النووى هو اتحاد نويات الذرات الخفيفة معاً لتكوين نويات ذرات أثقل ، والأساس الذى يعتمد عليه فى توليد الطاقة من تفاعلات الاندماج النووى والانشطار على حد سواء هو فقد جزء من الكتلة ، وتحويله إلى طاقة طبقاً لمعادلة الطاقة (ط = ك × ع^{٢}) حيث ط كمية الطاقة بالجول والناتجة عن تحول كتلة مقدارها ك (كجم) ، ع هى سرعة الضوء وتساوى ٣٠٠ مليون متر/ث ، وتظهر الطاقة عادة كطاقة حركية لنواتج التفاعل الجديدة وتتحول إلى حرارة ثم إلى كهرباء ، ويحدث تفاعل الاندماج النووى بصفة مستمرة فى الشمس والنجوم الأخرى ، وهو المسئول عن الحرارة التى نشعر بها فوق سطح الكرة الأرضية التى لا يمكن استمرار الحياة بدونها ، وفى هذا التفاعل تتحرك ذرات الهيدروجين بسرعات هائلة بسبب درجات الحرارة العالية حتى أنها تندمج عندما تصطدم بعضها ببعض وتتحول بالتدريج إلى ذرات الهيليوم .

إن تجربة مفاعل توكا ماك المقامة برغبة دولية مشتركة (مشروع مشترك قامت به الولايات المتحدة وروسيا وأوروبا واليابان) تنبئ بأنه فى وسط القرن القادم سيصبح الاندماج النووى على الأغلب متاحاً تجارياً .

كيفية الحصول على تفاعل اندماجى :

لكى تحدث التفاعلات الاندماجية يجب أن تتحرك الجسيمات الذرية بسرعات هائلة قبل تصادمها ، ويمكن الحصول على هذه السرعات بتسخين الجسيمات إلى درجات حرارة عالية

جداً تصل إلى ١٠٠ مليون درجة مئوية ، وقبل الوصول لهذه الدرجة تتخلص الذرات من الكتروناتها ، وتصبح خليطاً من الأيونات الموجبة الشحنة والإلكترونات الحرة ، وتسمى البلازما ، وتوجد البلازما فى مصابيح الفلورسنت المتوهجة ، أما البلازما فعند درجات الحرارة العالية يمكن أن تحدث بها تصادمات اندماجية ، وإن كان من الصعب توفير ظروف تخليق هذه البلازما ، لكتلتها الصغيرة جداً فإنها إذا ما مست جدار الوعاء الذى يحتويها فسوف تبرد فى الحال ، وستنتهى إمكانية حدوث التفاعل الاندماجى ، ورغم ذلك فإن درجة حرارة الوعاء الحاوى لن ترتفع إلا قليلاً لأن كتلته وسعته الحرارية كبيرة جداً بالمقارنة بالبلازما ؛ لذلك يجب الاحتفاظ بالبلازما بعيداً عن جدران الوعاء الحاوى لها ، وهذا غير ممكن إلا عن طريق نظرية استخدام بلازما مركزة أو عالية الكثافة بحيث يحدث التفاعل الإندماجى سريعاً وقبل هروب أيونات البلازما .

وتجرى الآن تجارب فى أماكن مختلفة من العالم لمحاولة تطبيق هذه النظرية باستخدام أشعة الليزر الكثيفة أو الجسيمات المشحونة لضغط الوقود إلى كثافات عالية للغاية مع تسخينه فى الوقت نفسه إلى درجة حرارة التفاعل النووى الاندماجى ، ومع ذلك فإن الطريقة المفضلة فى معظم دول العالم المتقدمة للحفاظ على البلازما هى استخدام المجال المغناطيسى ، فلو سلطنا مجالاً مغناطيسياً على البلازما أو هذه الجسيمات المشحونة المتحركة فإنها لن تتحرك عشوائياً ، وإنما ستدور حول خطوط المجال المغناطيسى (شكل ٢) .

شكل (٢) : كيفية الحفاظ على البلازما حول المجال المغناطيسى داخل المفاعل

وقد ابتكرت نظم كثيرة ومعقدة للمجال المغناطيسى المستخدم لحفظ البلازما ، ومنها ما يعرف باسم التوكاماك الذى يستخدم فيه مجالين مغناطيسيين متعامدين ، وتؤثر القوة الناتجة على الجسيمات أو البلازما ، فتجعلها تسلك طريقاً لولبياً حول خطوط المجال كما تحصر البلازما وتحفظها بعيداً عن جدران الوعاء الحاوى لها .

وتدرس حالياً سبل استخراج الطاقة من المفاعل ، فالنيوترونات التى تخرج بسرعات عالية نتيجة الاندماج النووى لن يحفظها المجال المغناطيسى بلا شحنة كهربية ، وهذه النيوترونات تصطدم بطبقة الليثيوم التى تحيط بالبلازما ، ومن ثم ترفع درجة حرارته وتنتقل حرارة الليثيوم السائل إلى الماء الذى يتحول إلى بخار ، ويستخدم البخار فى توليد الكهرباء ، وهناك فائدة أخرى من استعمال الليثيوم ، وهو أنه باصطدام النيوترونات به يتحول بعضه إلى تريتيوم وهو أحد مكونات الوقود الضرورية للتفاعل الاندماجى ويلزم فصله لإعادة استخدامه ثانية .

وخلافاً للتصورات الشائعة فإن تقنيات الاندماج القائمة ليست نظيفة بطبيعتها لأن النيوترونات تفلت منه ، وبالتالى تجعل المواد المحيطة (مواد المفاعل ذاته) نشيطة إشعاعياً ولكن هناك تقنيات الاندماج الأخرى التى تشمل دورات وقود متطورة قد تكون فقيرة فى النيوترونات أو خالية منها فتسمح للاندماج النووى بأن يصبح مصدراً نظيفاً للطاقة .

ويمكن أن تقدم يوماً ما مفاعلات هجينه تجمع الانشطار مع الاندماج النووى إذ تمتص النيوترونات الخارجة من تفاعلات الاندماج ببطانة من مادة قابلة للانشطار حيث تقوم هذه بدورها بتحويل اليورانيوم الطبيعى أو عناصر أخرى إلى مادة انشطارية .

ومع أن إنشاء ٢٠٠٠ مفاعل إضافى فى العالم يعد أمراً ممكناً من الناحية التقنية ، إلا أن هناك هوة واسعة بين هذه الإمكانية وبين الضغوط السياسية والمجتمعية . ولقد أصدرت الهيئة العالمية للبيئة والتنمية تقريراً عام ١٩٨٧ بعنوان (مستقبلنا المشترك) اعترفت فيه بإمكانات الطاقة النووية إلا أنها اشترطت أن يكون هناك إجراءات إنذار مبكر فى حالة وقوع

حادث نووى ، وكذلك وجود تدريب على الاستجابة لحالات الطوارئ والأنظمة الخاصة بنقل المواد المشعة ومعايير تتبعها لتدريب المشتغلين عليها وإجراءات الترخيص ، والتشريعات اللازمة لتشغيل المفاعلات وقواعد السلامة من عمل تقارير عن عمليات تفريغ الوقود وإعادة معالجته ، والأسس التى يتم على أساسها اختيار المواقع والمواصفات الخاصة بمخازن النفايات ، وإجراءات إزالة التلوث وتفكيك .

وينادى كثير من العلماء والمفكرين بأن تتولى جهة دولية إدارة الطاقة النووية عالمياً لضبط الجودة والتشغيل الدقيق الصارم وإعادة المعالجة والتخلص من النفايات ، وهذه فكرة الإدارة الدولية للطاقة النووية التى تم طرحها لأول مرة منذ عام ١٩٤٦ فى خطة باروخ – اتشيسون ، وفى عام ١٩٧٠ تم وضع معاهدة عدم انتشار الأسلحة النووية والتى انضمت لها ١٤٠ دولة عام ١٩٩٠ ، وأنشئ بموجب نظام الضمانات العالمى ، والتى تديره الوكالة الدولية للطاقة الذرية .

وللمفاعلات النووية فوائد أخرى غير توليد الكهرباء فبعض هذه المفاعلات تستخدم فى تحضير بعض النظائر المشعة التى لا توجد فى الطبيعة وتستعمل فى الطب لعلاج بعض الأمراض ، واكتشاف بعض الأورام وتدمير بعض الخلايا السرطانية ، كذلك يمكن استخدام هذه النظائر فى كثير من دراسات وبحوث التفاعلات الكيمائية والبيولوجية لمتابعة سير هذه التفاعلات وفهم بعض ما يدور فيها كما سنوضح بالتفضيل فى الفصول التالية ، كذلك استخدمت بعض هذه النظائر المشعة فى الصناعة للكشف عن بعض الأخطاء التى قد تحدث فى عمليات التصنيع ، أو للكشف عن بعض الشروخ الدقيقة فى اللحامات المعدنية .

المحركات النووية :

يعتبر الاختيار النووى اختياراً منطقياً لإيجاد مصادر الطاقة ذات الحيز المحدود نسبياً واللازمة لوسائل الانتقال المكلفة بقطع مسافات كبيرة دون الحاجة لإعادة التزود بالوقود ، ومن أنجح التطبيقات فى هذا المجال استخدام المحركات النووية فى العائمات البحرية وبخاصة فى الغواصات وحاملات الطائرات ، كما أن المولدات الحرارية الكهربية المستعينة بنظير

البلوتونيوم-٢٣٨ توفر الطاقة الكهربية اللازمة لسفن الفضاء ، وتتواصل البحوث والتطورات على مفاعلات لطائرات والصواريخ أملاً فى استخدامها فى رحلات مستقبلية .

مفاعلات المحركات البحرية :

يرجع الفضل فى تطور الأسطول الأمريكى العامل بالطاقة النووية إلى أمير البحر "ريكوفر" الذى أتسم بشخصية إدارية حازمة وفاعلة ، وتمتاز الغواصات العاملة بالطاقة النووية بقدرتها على السفر لمسافات بعيدة دون الحاجة لإعادة التزود بالوقود ، وتستطيع أن تظل تحت سطح الماء ما شاءت لأنها لا تحتاج الأكسجين فى عمل مولدها النووى ، وكانت الغواصة نويتلس Nautilus وهى باكورة الغواصات النووية ، وتم تدشينها فى عام ١٩٥٥ ، وقد تم تحويلها إلى متحف شاهد على هذه الحقبة المتطورة فى تاريخ البحرية العالمية فى عام ١٩٨٠.

وعلى مر الأعوام تنامى الأسطول الأمريكى بسرعة ليبلغ ١٣٤ غواصة عاملة ، ٩ ناقلات ، ٤ حاملات طائرات فى عام ١٩٨٦ ، إلى جانب ذلك أنتجت الولايات المتحدة الأمريكية سفينة شحن مدنية واحدة تعمل بالطاقة النووية ، وقد عملت بنجاح فى أوائل الستينيات بين العديد من الدول لخدمة التجارة بينها ، ولقد كان لبرنامج الأسطول النووى مردوداً تجارياً جيداً لأنه أثبت فعالية المفاعلات العاملة بالماء المضغوط ، ووفر عدداً من الكفاءات الفنية الصناعية من بين من تقاعد أو فقد وظيفته فى برنامج الأسطول .

المفاعلات الفضائية :

بدأ مشروع تطوير محرك طائرات يعمل بالطاقة النووية فى نفس توقيت البدء فى تطوير المحركات البحرية تقريباً وفى نفس المنطقة أيضاً ، ففى عام ١٩٤٦ فى أوك ريدج وضعت الأسس لبرنامج نقل السلاح النووى بواسطة طائرات أسرع من الصوت بعيدة المدى (١٢٠٠٠ ميل) لا تحتاج لإعادة تزود بالوقود ، غير أن المشروع تعرض لمتاعب عدة ولزم نقله وإعادة توجيه سياساته وتغيير إدارته ، كما اصطدم المشروع بمصاعب فنية مثل ضرورة تأمين طاقم الطائرة ووقايته ، وقد جاء فى التقرير النهائى تحديداً ثلاث قضايا هامة عجز البرنامج عن

الوفاء بها بالرغم من نجاحه الجزئى فى بعضها ، وهى : الحاجة إلى طائرة أكبر مما كان متوقعاً والتحسينات اللازمة للمحركات النفاثة العامة بالوقود الكيميائى وأخيراً اختيار الصواريخ العابرة للقارات الحاملة للسلاح النووى .

ولقد شهد البرنامج ما يمكن تسميته "بعودة الروح" عام ١٩٦١ عندما قرر الرئيس الأمريكى جون كيندى برنامجاً يستهدف الهبوط على سطح القمر بمركبة مأهولة ، وإذ تتصف رحلة كهذه بالحاجة إلى طاقة كبيرة كان الوقود النووى الخفيف الوزن هو الاختيار المنطقى لتوفير الطاقة الكهربية والدفع بها ، وفى عامى ١٩٥٥ ، ١٩٧٠ تم تطوير نظام حرارى كهربى يشتمل على وقود من اليورانيوم وهيدريد الزركونيوم وسائل الصوديوم – بوتاسيوم كمبرد ، وقد تم اختيار النظام على الأرض لمدة ١٠ آلاف ساعة ، وتم استخدامه فى أحد الأقمار الصناعية لمدة ٤٣ يوم عام ١٩٦٥ ، ألا أن النظام الذى حاز الاهتمام الأكبر فى برنامج الفضاء اعتمد على الهيدروجين السائل حيث تم تسخينه إلى درجة عالية بعبوره كغاز من خلال فتحات المفاعل ، وحيث يعمل الجرافيت كمهدئ ، ويعمل اليورانيوم المثرى كوقود ، ويقوم الهيدروجين بدور الدافع للمركبة عند خروجه من فتحة العادم مما يؤدى إلى خفض زمن الطيران، وتقدر فعاليته فى ذلك بمقدار ضعف فعالية الوقود الكيميائى التقليدى ، إلا أن البرنامج بالرغم من نجاحاته تم وقفه عام ١٩٧٣ بسبب تغيرات لحقت ببرامج وكالة الفضاء الأمريكية " ناسا " .

مرت سنوات حتى بدأت دراسة فى لوس الأموس عام ١٩٧٩ استستهدفت تصنيع مفاعل فضائى يمكنه إعطاء قدره ١٠٠ كيلووات ، وقد اعتمد المشروع على الأنابيب الساخنة حيث يتم تبخير سائل عند طرف ليتكثف عند الطرف الآخر من الأنبوبة وليحدث تدفق معاكس بفعل الخاصة الشعرية على امتداد جدار الأنبوبة الداخلى ، وتمتاز الفكرة بعدم اعتمادها على التحريك الميكانيكى بقصد نقل الحرارة ، وقد تأسس التصميم الأول على استخدام وقود اليورانيوم شديد الثراء (٩٣%) فى هيئة "UO_2 " مع وجود طبقات من سبيكة الموليبدنم بين ألواح الوقود المتراصة وتتواجد أنبوبة التسخين المركزية كما يستخدم الليثيوم كمبرد ، كما يستعمل أكسيد البريليوم كعاكس ، وله اسطوانات تحكم دوارة بقطاعات من كربيد البورون ، وتشع الحرارة من أنابيب التسخين إلى محولات حرارية كهربية ويتحول بمقدار حوالى ٧% من الطاقة الحرارية إلى الكهربية بينما يشع الباقى إلى الفضاء ، ولتجنب حدوث متاعب خلال

عملية الإطلاق يتم استخدام غالق مركزى من البورن-١٠ بدلاً من أكسيد البريليوم وعند بداية تشغيل المفاعل .

فى عام ١٩٨٣ تشكل برنامج للاستخدام النووى فى الفضاء جمع ثلاث مؤسسات كبرى من بينها " ناسا " ليواجه احتياجين محدودين هما :

أولاً : التوصل إلى مفاعل يعطى قدرة فى النطاق بين ١٠٠ كيلووات و ١ ميجاوات ولفترة عمر تبلغ سبع سنوات وبوزن يقل عن ٧٥٠٠ كجم وبحجم مناسب لحمولة مكوك الفضاء .

ثانياً : التوصل إلى مفاعل بقدرة عدة ملايين وات قادر على إعطاء الطاقة بشكل منتظم أو اندفاعى ، ورشح لذلك المفاعلات المبردة بالغاز والمفاعلات الحرارية الأيونية والمفاعلات السريعة المبردة بالوسائل والغازات ، وتشترك البحوث الحكومية والصناعية من أجل اختيار الأمثل من بينها لتطويره ، وتشمل الدراسات على تقويم الوقود النووى والمواد المستعملة والإدارة الحرارية وتحويل الطاقة .

المحركات الفضائية :

يجرى استخدام أنواع من الوقود الكيميائى لإطلاق واستعادة المركبات الفضائية ومنها المكوك الفضائى ، إلا أن الرحلات الطويلة بين الكواكب تحتاج التزود بالطاقة الكهربائية اللازمة للتحكم والاتصال لمدد تبلغ سنوات وهنا تبرز أهمية الطاقة النووية ، ولقد تم تطوير المولد الحرارى ذى النظير المشع واستخدامه بنجاح فى ١٨ رحلة ، حيث استخدم مواد مشعة طويلة العمر للإمداد بالحرارة التى تتحول إلى طاقة كهربائية ، ويتصف مصدر الطاقة هذه بمواصفات مرغوبة من أهمها :

١- خفة الوزن ومحدودية الحجم بما يتلاءم مع المساحة المتاحة فى المركبة الفضائية .
٢- طول عمر الأداء .
٣- الإنتاج المتواصل للطاقة .
٤- مقاومة التأثيرات المحيطة مثل البرودة والإشعاع وغيرها .
٥- الاستغناء عن الطاقة الشمسية بما يسمح بزيادة الكواكب البعيدة .

والنظير المشع المستغل لهذا المولد هو البلوتونيوم-٢٣٨ ، وفترة نصف عمره تبلغ ٨٧,٧ سنة ، ويشع جسيمات ألفا بطاقة ٥,٥٠ مليون الكترون فولت ، وتتيح هذه الخواص نشاطية عالية تبلغ ١٧ كورى/جرام ونسبة مرغوبة بين الطاقة والوزن تبلغ ٠,٥٧ وات/جرام وقد استعانت رحلة أبوللو-١٢ إلى القمر بمولد من هذا النوع لتشغيل مجموعة من الأجهزة العلمية لقياس المجالات المغناطيسية والتراب والرياح الشمسية والأنشطة الزلزالية ، كما استخدم هذا الطراز من المولدات فى رحلات أبوللو عامى ١٩٦٩،١٩٧٧ وفى رحلة فايكنج عام ١٩٧٥ تم استخدام مولد أصغر ساهم بفاعلية فى إرسال صورة سطح كوكب المريخ إلى الأرض .

وقد تلى ذلك دخول الطراز المتقدم من المولدات والمسمى عديد مئات الوات الذى زود المركبتين فويجر بطاقتهما الكهربائية الكاملة ، ويرجع الفضل فى تصنيعه إلى معمل المحركات النفاثة التابعة لوكالة الفضاء الأمريكية " ناسا " ، وقد تم إطلاق المركبتين فى صيف عام ١٩٧٧ ، ووصلا كوكب المشترى عام ١٩٧٩ ثم زحل عام ١٩٨١ ، وأرسلتا صوراً لأقمار الكواكب وحلقاته ، ثم تم توجيه فويجرا إلى خارج المجموعة الشمسية ، أما فويجر ٢ فقد أمكن استثمار وقوع ثلاث كواكب على خط مستقيم فى توجيه فويجر ٣ لزيارة كوكب أورانوس فى يناير ١٩٨٦ .

وقد جرى على أثر ذلك اكتشاف أقمار جديدة للكوكب وتبين أهميتها فى استقرار حلقات الكوكب بفعل جاذبيتها ، وقد وصلت فويجر ٢ إلى كوكب نبتون فى عام ١٩٨٩ ثم اتجهت بعد ذلك إلى أغوار الفضاء خارج المجموعة الشمسية ، ويستخدم مولد عديد مئات الوات السليكون -جيرمانيوم كمادة حرارية كهربية ، ويعد أثقل وإن كان أقوى من سابقة ، ويدخل المولد فى أقمار لينكولن التجريبية التى مكنها إجراء الاتصال ببعضها البعض وبينها وبين السفن البحرية والطائرات .

وفى التسعينيات تم تزويد المركبة جاليليو التى توجهت إلى كوكب المشترى ، وحصلت على عينة من سطحه بمولد حرارى متعدد الأغراض ، واتجهت الأنظار إلى مولدات طاقة قادرة على تغذية الرحلات الأطول فى المستقبل وتعمل بفعل تسخين سائل عضوى Downtherm A بواسطة مصدر مشع مما يؤدى إلى تكون بخار يحرك توربين متصل بالمولد الكهربى ، وتعرف

تلك المولدات اختصاراً DIPS ، وقد تم تجريبها على الأرض لمدة ٢٠٠٠ ساعة متواصلة دون هبوط فى الأداء .

تطبيقات طبية للمولدات النظائرية :

تعد المولدات العاملة بالنظائر المشعة أملاً واعداً فى ميدان التطبيقات الطبية ، ومن أهمها تشغيل منظم ضربات القلب ، والذى يعطى نبضات كهربية صغيرة تنظم ضربات القلب فالمنظم ذو المئات المعدودة من الميكروواوت والمزود بطاقة من كميات صغيرة من البلوتونيوم-٢٣٨ سيعيش عديد من السنوات ، ويتفوق على تلك المنظمات العاملة بالبطاريات ، والتى تحتاج فى استبدالها إلى عمليات جراحية ، وطول العمر الذى تتصف به تلك المولدات يجذب الانتباه إلى إمكان استخدامها فى تصنيع منظم المخ الذى يوقف نوبات الصرع .

وقد ساعد نجاح مولدات الطاقة اللازمة للتطبيقات الفضائية فى الإسراع بوضع برامج لتطوير قلب صناعى يعمل بالطاقة النووية ، والمكونات الأساسية لمثل هذا النظام هى :

١- مولد حرارة وقدرة ٣٢ وات بالنظير بولوتونيوم-٢٣٨ .
٢- محرك يعمل كمحول حرارى يستخدم الأرجوان كمانع تشغيل .
٣- مضخة ميكانيكية للدم .
٤- شرايين صناعية بلاستيكية .

ويتيح النظام قُدرة ٣ وات لدوران الدم ، إلا أن البرنامج الأساسى أوقف ويظن أن هذا الإيقاف لن يطول لأن أمراض القلب أصبحت القاتل الأول فى العالم ، ومما لاشك فيه أن قلباً صناعياً يعمل بالوقود النووى صغير ومحدود المكونات ، ويسهل حمله سيستطيع إسدال الستار على معاناة المرضى فى تعاملهم مع القلوب الصناعية الميكانيكية التى تعوق حركتهم وأصبحت أقل نجاحاً فى إنقاذ حياتهم من عمليات زرع القلب .