مجلة الاتحاد العربي
للنشر العلمي

الإصدار السادس والعشرين

المجلد (٧) العدد (٢)

(١- ١٧) ٢٠٢٦

تحسين أداء مفاعلات الجيل الرابع باستخدام مبردات متقدمة عالية الكفاءة

د/ خالد غيث القريزى
(عضو لدى الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

تاريخ النشر: نُشر إلكترونياً بتاريخ ١ أبريل ٢٠٢٦ م

الملخص :
تمثل مفاعلات الجيل الرابع النووي تقدما تحويليا في التكنولوجيا النووية، حيث تؤكد على تعزيز السلامة والاستدامة والكفاءة والجدوى الاقتصادية من خلال النشر الاستراتيجي لمبردات متقدمة عالية الكفاءة. تفحص هذه الدراسة كيف تمكن المبردات مثل أملاح الفلوراید المنصهرة، ومواد الرصاص-البيسموت اليوتكتيكية (LBE)، والمياه فوق الحرجة، والهيليوم المفاعلات من الجيل الرابع من تحقيق كفاءة حرارية تتراوح بين ٤٤-٥٠٪ مقارنة ب ٣٢-٣٤٪ في مفاعلات المياه الخفيفة التقليدية (LWRs). تحلل الدراسة ستة مفاهيم للمفاعل—المفاعل السريع المبرد بالصوديوم (SFR)، المفاعل السريع المبرد بالرصاص (LFR)، المفاعل السريع المبرد بالغاز (GFR)، المفاعل عالي الحرارة جدا (VHTR)، المفاعل المبرد بالماء فوق الحرج (SCWR)، ومفاعل الملح المنصهر (MSR)—مما يوضح كيف تمكن المبردات المتقدمة من استهلاك الوقود بشكل أفضل (>٥٠-٦٠٪ من موارد اليورانيوم مقابل ~١٪ في المياه ذات الماء المنصهر)، وميزات السلامة السلبية المحسنة، وتطبيقات موسعة تشمل إنتاج الهيدروجين وتسخين العمليات الصناعية. يكشف التحليل أن اختيار المبرد يحدد بشكل أساسي أداء المفاعل الحراري-الهيدروليكي، وخصائص النيوترونات، وتوافق المواد، واستجابة السلامة، والجدوى الاقتصادية، مع اختيار مثالي يعتمد على متطلبات التطبيق الخاصة وسياق النشر.

الكلمات المفتاحية:
(مفاعلات الجيل الرابع، مبردات متقدمة، كفاءة حرارية، تبريد المعادن السائلة، أنظمة الملح المنصهر)

Abstract:
Fourth-generation nuclear reactors represent a transformative advance in nuclear technology, emphasizing enhanced safety, sustainability, efficiency, and economic viability through the strategic deployment of advanced, highly efficient coolants. This study examines how coolants such as molten fluoride salts, lead-bismuth eutectic materials (LBEs), supercritical water, and helium enable fourth-generation reactors to achieve thermal efficiencies of 44–50%, compared to 32–34% in conventional light water reactors (LWRs). This study analyzes six reactor concepts—sodium-cooled fast reactor (SFR), lead-cooled fast reactor (LFR), gas-cooled fast reactor (GFR), extra-high

temperature reactor (VHTR), supercritical water-cooled reactor (SCWR), and molten salt reactor (MSR)—demonstrating how advanced coolants enable better fuel utilization (>50–60% of uranium resources versus ~1% in molten water reactors), enhanced passive safety features, and expanded applications including hydrogen production and industrial process heating. The analysis reveals that coolant selection fundamentally determines the thermohydro-hydraulic reactor's performance, neutron characteristics, material compatibility, safety response, and economic viability, with the optimal choice depending on specific application requirements and deployment context.

Keywords:
(Fourth generation reactors, advanced coolants, thermal efficiency, liquid metal cooling, molten salt systems)

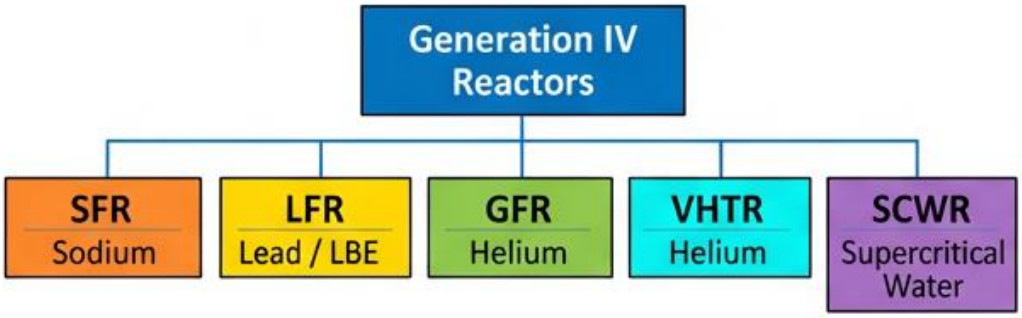
المقدمة

١,١ مفاهيم مفاعلات الجيل الرابع وتطويرها

تمثل مفاعلات الجيل الرابع تقدما مهما في التكنولوجيا النووية، أطلقها المنتدى الدولي للجيل الرابع (GIF) في عام ٢٠٠٠، مع التركيز على ستة أنواع مبتكرة من المفاعلات: المفاعل السريع المبرد بالغاز (GFR)، المفاعل السريع المبرد بالرصاص (LFR)، مفاعل الملح المنصهر (MSR)، المفاعل السريع المبرد بالصوديوم (SFR)، المفاعل المبرد بالماء فوق الحرج (SCWR)، والمفاعل عالي الحرارة جدا (VHTR) (بيورو وآخرون، ٢٠٢٣). تبتعد هذه التصاميم المتقدمة بشكل جذري عن تقنية مفاعلات المياه الخفيفة التقليدية من خلال استخدام مبردات بديلة بدلا من الماء، مما يتيح التشغيل في درجات حرارة وضغوط أعلى مع تحقيق أداء فائق عبر أبعاد متعددة.

السمة المميزة لأنظمة الجيل الرابع هي استخدامها لمبردات متقدمة تتيح درجات حرارة تشغيل مرتفعة—حيث تصل المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم إلى حوالي ٥٥٠°م، بينما تتجاوز المفاعلات المبردة بالغاز والملح المنصهر ٧٥٠-٩٥٠°م (أغبيفانو وآخرون، ٢٠٢٣؛ فورسبرغ، ٢٠٢٢). تترجم هذه درجات الحرارة العالية مباشرة إلى تحسين الكفاءة الحرارية، وتوسيع قدرات التطبيق إلى ما هو أبعد من توليد الكهرباء، وتعزيز الاستدامة من خلال دورات الوقود المغلقة التي تستفيد من اليورانيوم بشكل أكثر اكتمالا مع تقليل النفايات المشعة طويلة العمر (شولنبرغ، ٢٠٢٢).

تنشأ تحسينات السلامة من خلال ميزات سلبية تشمل آليات تغذية راجعة سلبية تبطئ تلقائيا تفاعلات الانشطار إذا ارتفعت درجات الحرارة، مما يلغي الاعتماد على أنظمة التحكم النشطة والطاقة الخارجية (هاشم وآخرون، ٢٠٢٤). تظهر مشاريع مثل وحدة مفاعل الحرارة العالية الصينية-قاعدة الحصى (HTR-PM) تقدما عمليا، حيث تحولت هذه التقنيات من التصاميم المفاهيمية إلى النشر التجاري (ناغاتسوكا وآخرون، ٢٠٢٤).



الشكل ١. *أنواع مفاعلات الجيل الرابع ومبرداتها الأساسية*

يوضح هذا الشكل العلاقة المباشرة بين مفاهيم مفاعلات الجيل الرابع وتقنيات المبردات الأولية المقابلة لها. يبرز كيف يؤثر اختيار المبرد بشكل أساسي على ظروف تشغيل المفاعل، وطيف النيوترونات، وخصائص السلامة، والكفاءة الحرارية الممكنة. تعتمد المفاعلات السريعة مثل SFR وLFR على مبردات المعادن السائلة للحفاظ على طيف نيوترونات سريع واستهلاك وقود عالي، بينما تستخدم المفاعلات ذات درجات الحرارة العالية مثل GFR وVHTR الهيليوم لتمكين التشغيل في درجات حرارة عالية جدا. يمثل SCWR نهجا تطوريا، يستخدم المياه فوق الحرجة لتحسين الكفاءة مع الحفاظ على التشابه مع المفاعلات التقليدية المبردة بالماء.

١,٢ الدور الحاسم لمبردات المتقدمة

تستخدم مفاعلات الجيل الرابع مبردات متقدمة — الأملاح المنصهرة، الرصاص-البزموت اليوتكتيكي، الماء فوق الحرج، والهيليوم — لتعزيز الكفاءة والسلامة مع تمكين التشغيل في درجات حرارة أعلى بكثير من الأنظمة التقليدية المبردة بالماء (بارنز وآخرون، ٢٠١٩). تؤدي هذه المبردات وظائف حيوية متعددة: استخراج الطاقة الحرارية من عناصر الوقود، توفير التعديل للنيوترونات في مفاعلات الطيف الحراري، إنشاء حماية من الإشعاع، تمكين إزالة الحرارة من التحلل السلبي، والعمل كوسيط للتحكم في المفاعلات (أغبڤانو وآخرون، ٢٠٢٣).

تظهر أملاح الفلورايد المنصهرة قدرة حرارية عالية واستقرارا كيميائيا عند درجات حرارة مرتفعة (>٦٥٠°م)، مما يدعم تحسينات التحكم الحراري وربما تمكين إعادة تدوير الوقود عبر الإنترنت في تكوينات الوقود السائل (فورسبرغ، ٢٠٢٢؛ بارنز وآخرون، ٢٠١٩). تعزز تفاعلية الرصاص-بزموت اليوتكتيكية المنخفضة مع الهواء والماء هوامش الأمان مقارنة بالصوديوم، بينما توفر كثافته العالية (١٠,٢٠٠ كجم/م^3) قدرة دوران طبيعية ممتازة لإزالة الحرارة السلبية من التحلل (تشانغ، ٢٠١٣؛ هاشم وآخرون، ٢٠٢٤). تلغي المياه فوق الحرجة ظواهر تغير الطور مع تمكين التشغيل المباشر في دورات المخرج عند درجات حرارة ٥٠٠-٦٢٥°م، محققة كفاءة حرارية تتراوح بين ٤٤-٤٥٪ (أوكا، ٢٠٢٣). تمكن الخمول الكيميائي للهيليوم وقدرته على درجات الحرارة العالية (٨٥٠-١٠٠٠°م) من كفاءة حرارية تقترب من ٥٠٪ من خلال تحويل الطاقة مباشرة لدورة برايتون (جاد بريغز وبيليديس، ٢٠١٦؛ ناغاتسوكا وآخرون، ٢٠٢٤).

تسمح درجات الحرارة التشغيلية الأعلى بكفاءة حرارية تتجاوز ٤٤٪، متجاوزة بكثير المفاعلات التقليدية (٣٢-٣٤٪)، مع فتح فرص لإنتاج الهيدروجين، وتخليق الوقود الصناعي، وتطبيقات الحرارة الصناعية (الزرير وآخرون، ٢٠٢٢؛ هو وآخرون، ٢٠٢٤). تقلل أنظمة السلامة السلبية المبنية على الظواهر الفيزيائية الطبيعية بدلا من الضوابط النشطة من مخاطر الحوادث — على سبيل المثال، يقلل التغذية الراجعة السلبية تلقائيا من معدلات الانشطار إذا ارتفعت درجات الحرارة، مما يوفر حماية جوهرية دون تدخل المشغل (فورسبيرغ وآخرون، ٢٠١٩).

٢. تقنيات المبرد المتقدمة

٢,١ أملاح الفلورايد المنصهر

اكتسبت أملاح الفلوريد المنصهر أهمية كخيارات مبردة لمفاعلات الجيل الرابع، خاصة في مفاعلات الملح المنصهر (MSRs)، التي تتكون أساسا من مركبات فلوريد مثل فلوريد الليثيوم (LiF) وفلوريد البيريليوم (BeF_2) لتشكيل تركيبات ($2LiF-BeF_2$) FLiBe (Barnes وآخرون، ٢٠١٩). تتميز هذه الأملاح بخصائص استثنائية تشمل نقاط غليان عالية (>١٤٣٠°م عند الضغط الجوي)، وسعة حرارية حجمية ممتازة (٤,٦٨ ميغاجول/م^3·K)، والاستقرار الكيميائي تحت الإشعاع الشديد، مما يمكن من تشغيل الضغط الجوي عند درجات حرارة ٦٥٠-٧٥٠°C (فورسبرغ، ٢٠٢٢).

ميزة رئيسية لأملاح الفلوريد المنصهرة هي قدرتها على البقاء سائلة عند ضغوط منخفضة نسبيا، مما يقلل بشكل كبير من مخاطر التسربات المضغوطة التي قد تهدد سلامة المفاعلات (بارنز وآخرون، ٢٠١٩). تبسط هذه الخاصية تصميم الاحتواء وتقلل من الضغوط الميكانيكية على المكونات الهيكلية مقارنة بالأنظمة المبردة بالماء عالية الضغط التي تعمل عند ١٥,٥-٢٥ ميغاباسكال. علاوة على ذلك، تتجمد أملاح الفلوريد المنصهرة عند درجات حرارة أقل بكثير (٤٥٩°م ل FLiBe) مقارنة بالعديد من المبردات البديلة، رغم أنها لا تزال تتطلب أنظمة حماية من التجمد خلال فترات الإيقاف (فورسبيرغ وآخرون، ٢٠١٩).

القصور الحراري الاستثنائي الذي يوفره مبرد الملح المنصهر—السعة الحرارية الحجمية التي تزيد بحوالي ٤× عن الصوديوم و٤٠× أكبر من الهيليوم—يمكن خصائص الاستجابة العابرة المتفوقة وتسهل التكامل مع أنظمة تخزين الطاقة الحرارية لتثبيت الشبكة (فورسبيرغ & بيترسون، ٢٠١٦؛ يانغ & زو، ٢٠٢٥). ومع ذلك، فإن التأثيرات التآكل على المواد الهيكلية تتطلب سبائك متخصصة مثل Hastelloy-N وتطوير مواد متقدمة لضمان المتانة طويلة الأمد (Barnes وآخرون، ٢٠١٩).

٢,٢ ليد-بيسموت يوتيكتيك (LBE)

برز مبنى الرصاص-البسموت اليوتكتيكي (LBE)، المكون من ٤٤,٥٪ رصاص و٥٥,٥٪ بزموت بالوزن، كسائل تبريد واعد لمفاعلات الجيل الرابع السريع، حيث يقدم خصائص مميزة تعزز السلامة والكفاءة معا (تشانغ، ٢٠١٣). تذوب هذه السبيكة عند ١٢٥°م—وهي أقل بكثير من الرصاص الخالص (٣٢٧°م)—مع الحفاظ على نقطة غليان عالية جدا (١٦٧٠°م)، مما يوفر هوامش حرارية هائلة تتجاوز ١٠٠٠°م فوق درجات حرارة التشغيل النموذجية بين ٤٠٠-٥٥٠°م (هاشم وآخرون، ٢٠٢٤).

تكمن الفوائد الرئيسية ل LBE في تفاعله المنخفض مع الهواء والماء، على عكس الصوديوم الذي يتفاعل بقوة مع كليهما، مما يقلل من فرص الاحتراق أو الحوادث الانفجارية أثناء الأحداث غير المتوقعة (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥). توفر الكثافة الاستثنائية (١٠,٢٠٠ كجم/م^3) قوى دوران طبيعية قوية، مما يتيح إزالة الحرارة المتناثرة السلبية من خلال تدفق مدفوع بالطفو دون الحاجة إلى أنظمة ضخ نشطة (لو وآخرون، ٢٠٢٣). توفر الكتلة الذرية العالية ل LBE (المتوسط ٢٠٧) اقتصادا ممتازا للنيوترونات، تقلل من امتصاص الطفيليات مع إنتاج تحلل طيفي طفيف، مما يعزز إمكانات التكاثر في تكوينات الطيف السريع (تشانغ، ٢٠١٣).

أجرى هاشم وآخرون (٢٠٢٤) تقييما شاملا للسلامة لمفاعل مبرد ب LBE في ظروف الحالة المستقرة وغير المحمية العابرة، بما في ذلك فقدان التدفق غير المحمي (ULOF)، والقدرة الزائدة غير المحمية (UTOP)، وفقدان مشتت الحرارة غير المحمي (ULOHS). أظهرت النتائج خصائص أمان متأصلة ممتازة، حيث أدت جميع الانتقالات التي تم تحليلها إلى درجات حرارة وقود قصوى أقل من حدود السلامة بسبب معاملات التغذية الراجعة السلبية القوية وقدرة الدوران الطبيعي القوية. يمنع هامش الغليان الهائل تماما تغيير طور المبرد حتى أثناء الحوادث الشديدة، بينما تؤدي الخمول الكيميائي إلى إلغاء تفاعلات الماء المبرد الطاقي التي تعاني منها أنظمة المبردة بالصوديوم (هاشم وآخرون، ٢٠٢٤).

ومع ذلك، يواجه LBE تحديات في توافق المواد بما في ذلك تآكل الذوبان وهشاشة المعادن السائلة عند درجات حرارة مرتفعة (<٥٠٠°C). أظهر تشو وآخرون (٢٠٢٤) أن الحفاظ على تركيز الأكسجين المذاب ضمن نافذة حماية ضيقة (10^{-6} إلى 10^{-5} نسبة وزن) يعزز تكوين طبقات أكسيد الحماية على الأسطح الفولاذية، مما يقلل معدلات التآكل إلى مستويات مقبولة (<٢٥ ميكرومتر/سنة). تظهر المواد المتقدمة، بما في ذلك الفولاذ الحديدي-

المارتنسيتي وسبائك التعزيز بالتشتت الأكسيد (ODS) مقاومة إشعاعية وأداء متفوقة ضد التآكل، رغم أنها تتطلب تأهيلا طويل الأمد في ظل الظروف الأولية (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥).

٢,٣ المياه فوق الحرجة

تمثل المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرجة (SCWRs) تقدما تطوريا في تكنولوجيا المياه المنخفضة الحرجة، حيث تشغل الماء فوق نقطته الحرجة (٣٧٤°C، 22.1 ميغاباسكال) حيث تختفي المراحل السائلة والبخارية المميزة (Oka, 2023). تقضي هذه الحالة فوق الحرجة على ظواهر الغليان وتمكن من تشغيل الدورة المباشرة مع أنظمة مبسطة—حيث يتدفق سائل التبريد مباشرة من اللب إلى التوربين دون الحاجة إلى مولدات بخار أو فواصل رطوبة أو مضخات إعادة تدوير تضيف تعقيدا وتكلفة لأجهزة PWR وBWR التقليدية (شولنبرغ، ٢٠٢٢).

من أبرز ميزات SCWRs قدرتها على التعامل مع درجات حرارة عالية من سائل التبريد دون انتقالات طورية، حيث تحقق درجات حرارة مخرج أساسية تتراوح بين ٥٠٠-٦٢٥°C وتمكن من كفاءة حرارية تتراوح بين ٤٤-٤٥٪—مما يمثل تحسنا بنسبة ٣٣٪ مقارنة بالمكسورات المنخفضة التقليدية المقيدة بكفاءة ٣٢-٣٤٪ (Oka, ٢٠٢٣). الارتفاع المستمر في درجة الحرارة أثناء التسخين فوق الحرج يتطابق بشكل أفضل مع ملف حرارة مصدر الحرارة مقارنة بدورات رانكين تحت الحرجة، مما يقلل من عدم القابلية للعكس الديناميكي الحراري ويحسن الكفاءة العامة (شولنبرغ، ٢٠٢٢).

تدعم SCWRs أطياف نيوترونية مختلفة تعتمد على تكوين النواة—حراري، سريع، أو مختلط—مع اختلافات مقابلة في نسب المعدلات إلى الوقود وأنماط تدفق المبرد (Oka، 2023). تستخدم تصاميم الطيف الحراري الماء كمبرد ومهدئ في نفس الوقت، بينما تقلل تكوينات الطيف السريع من التمديد من خلال ميل الشبكة الضيقة وقد تستخدم دوائر مهدئ مياه ثقيلة منفصلة، مما يتيح قدرة تكاثر مشابهة لمفاعلات المعادن السائلة السريعة (شولنبرغ، ٢٠٢٢).

درس هان وآخرون (٢٠٢٣) الأداء الحراري-الهيدروليكي لتجمعات وقود SCWR، وأظهروا أن فواصل الشبكة المزودة بريشات الخلط تعزز معاملات نقل الحرارة بنسبة ٢٠-٣٠٪ مقارنة بحزم القضبان العارية من خلال خلط التدفق وتعزيز الاضطراب. حددت الأبحاث معايير تصميم حاسمة تمنع تدهور انتقال الحرارة تشمل: الحفاظ على تدفق الكتلة فوق القيم العتبية (عادة > ١٠٠٠ كجم/م^2·ثانية)؛ الحد من تدفق الحرارة لتجنب درجات حرارة الجدران المفرطة؛ ضمان تبريد فرعي كاف عند مدخل النواة؛ وتنفيذ استراتيجيات توزيع التدفق التي تمنع المناطق ذات التدفق المنخفض (هان وآخرون، ٢٠٢٣).

ومع ذلك، تواجه SCWRs تحديات في المواد عند درجات حرارة عالية (٦٢٥°م) وضغط (٢٥ ميغاباسكال). تظهر الفولاذ المقاوم للصدأ التقليدي من الأوستنيت وسبائك الزركونيوم المستخدمة في الوابل المنخفض الحالية قوة ومقاومة غير كافية للتآكل، مما يستلزم مواد متقدمة تشمل السبائك الفائقة القائمة على النيكل والصلب المارتنسي الحديدي المتقدم (Oka, 2023). يتطلب الضغط التشغيلي العالي أوعية ضغط مفاعلات ذات جدران سميكة أو مفاهيم أنابيب ضغط بديلة مشابهة لمفاعلات CANDU، مما قد يحد من حجم اللب والقدرة الإنتاجية (شولنبرغ، ٢٠٢٢).

٢,٤ هيليوم

يعد الهيليوم المبرد المفضل لمفاعلات الجيل الرابع المبردة بالغاز عالية الحرارة (HTGR) والمفاعلات ذات درجات الحرارة العالية جدا (VHTR)، ويوفر مزايا قوية تشمل الخمول الكيميائي، وسلوك الطور الواحد عبر جميع درجات حرارة التشغيل، والشفافية مع النيوترونات، والقدرة على التشغيل في درجات حرارة عالية جدا (٨٥٠-١٠٠٠°م) (ناغاتسوكا وآخرون، ٢٠٢٤). تمكن هذه الخصائص من تحويل الطاقة مباشرة لدورة برايتون لتحقيق كفاءة حرارية تقترب من ٥٠٪، متجاوزة بشكل كبير دورات البخار التقليدية لرانكين (جاد بريغز وبيليديس، ٢٠١٦).

عادة ما تعمل المفاعلات المبردة بالهيليوم عند ضغوط تتراوح بين ٧-٩ ميغاباسكال، مع درجات حرارة خروج تتراوح بين ٧٥٠-٩٥٠°م حسب التصميم المحدد (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥). يستفيد جهاز VHTR بشكل

خاص من خصائص الهيليوم، حيث يدعم آليات السلامة السلبية من خلال دمج كثافة طاقة منخفضة للنواة، ومعتدل الجرافيت عالي التوصيل الحراري الذي يوفر كتلة حرارية كبيرة، ووقود الجسيمات المطلية (TRISO) القادر على الاحتفاظ بنواتج الانشطار عند درجات حرارة تتجاوز ١٦٠٠°م (Nagatsuka وآخرون، ٢٠٢٤).

استعرض ناغاتسوكا وآخرون (٢٠٢٤) تطوير مفاعل مبرد بالغاز عالي الحرارة في اليابان، موثقين التشغيل الناجح لمفاعل اختبار هندسة درجات الحرارة العالية (HTTR) الذي أظهر درجات حرارة مخرج المفاعل تجاوزت ٩٥٠ درجة مئوية وأكد ميزات السلامة السلبية خلال اختبارات فقدان التبريد القسري. أكدت الأبحاث أداء وقود الجسيمات المطلي ب TRISO في درجات الحرارة القصوى دون فشل، مما أكد قدرة استثنائية على الاحتفاظ بمنتجات الانشطار ضرورية لسلامة HTGR.

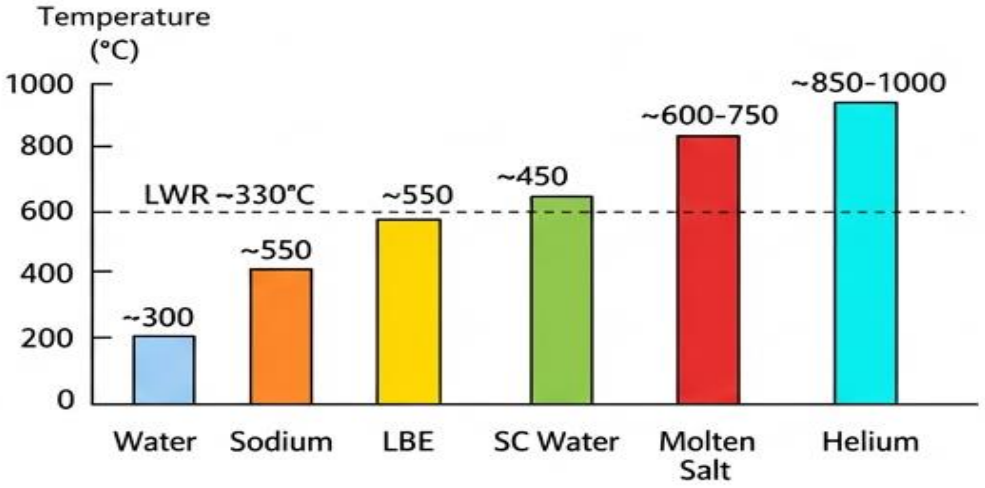
قام جاد بريغز وبيليديس (٢٠١٦) بتحليل دورات توربينات غاز برايتون المباشرة المستعادية البسيطة والمبردة بداخلها، وأظهروا أن دورات برايتون المستعادية تحقق كفاءة حرارية تتراوح بين ٤٨-٥٠٪ عند درجات حرارة دخول التوربين بين ٨٥٠-٩٠٠°م. أثبت جهاز الاسترداد — الذي يستعيد الحرارة المهدرة من عادم التوربين إلى تفريغ ضاغط ما قبل التسخين — ضروريا لتحقيق كفاءة عالية، مع معايير تصميم مثالية تشمل درجة حرارة مدخل التوربين ٩٠٠°م، ونسبة ضغط ٢,٥-٢,٨، وفعالية جهاز الاسترداد التي تتجاوز ٩٥٪.

ومع ذلك، فإن خصائص انتقال الحرارة الضعيفة للهيليوم—التوصيل الحراري الذي لا يتجاوز ٠,٣ واط/م·كلفن وكثافة منخفضة جدا (٢,٤ كجم/م^3 عند ٧ ميجا باسكال، ٥٠٠°م) — تتطلب معدلات تدفق كتلة كبيرة ودورات قوية لتحقيق إزالة حرارة كافية (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥). تواجه المفاعلات السريعة المبردة بالغاز تحديات خاصة في إزالة الحرارة الطارئة بسبب التحلل الطارئ بسبب انخفاض القصور الحراري للهيليوم، مما يتطلب حلولا مبتكرة تشمل احتواء الحاجز مع تبريد هواء سلبي وتصاميم وقود متقدمة ذات قدرة حرارية محسنة (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥).

٣. الأداء الحراري-الهيدروليكي وتعزيز الكفاءة

٣,١ تأثير درجة حرارة التشغيل على الكفاءة الحرارية

تحقق مفاعلات الجيل الرابع تحسينات كبيرة في الكفاءة الحرارية من خلال العمل في درجات حرارة أعلى بكثير من التصاميم التقليدية. لا يمكن لمفاعلات المياه الخفيفة النموذجية تجاوز النقطة الحرجة للماء (٣٧٤°م، ٢٢,١ ميغاباسكال)، مما يحد من الكفاءات الحرارية إلى ٣٢-٣٤٪ بسبب ظروف البخار المتواضعة (شولنبرغ، ٢٠٢٢). على النقيض من ذلك، تتيح المبردات المتقدمة درجات حرارة خروج تتراوح بين ٥٥٠-٩٥٠°م حسب نوع المبرد، مما يوسع مساحة دورة الديناميكا الحرارية ويزيد الكفاءة الحرارية بشكل مباشر وفقا لمبادئ كارنو (Pioro وآخرون، ٢٠٢٣).



الشكل ٢ . *درجات حرارة التشغيل والكفاءة الحرارية لمواد التبريد المتقدمة*

يقارن هذا الشكل نطاقات درجات الحرارة التشغيلية النموذجية لمبردات المفاعلات المتقدمة وتأثيرها المرتبط بها على الكفاءة الحرارية. يظهر بوضوح أن درجات حرارة مخرج المبرد الأعلى تتيح تحسينات كبيرة في الكفاءة الحرارية مقارنة بمفاعلات المياه الخفيفة التقليدية. تسمح مبردات المعادن السائلة والملح المنصهر بالعمل بدرجة حرارة حرجة للماء، بينما يتيح الهيليوم أعلى نطاق من درجات الحرارة بين جميع الخيارات. يبرز الخط المرجعي المتقطع الذي يمثل حدود مفاعلات المياه الخفيفة التقدم التكنولوجي لأنظمة الجيل الرابع. تدعم هذه المقارنة الأساس الديناميكي الحراري لتحقيق مكاسب كفاءة تتحقق من خلال نشر المبرد المتقدم.

الجدول ١ : *الكفاءة الحرارية المقارنة لأنظمة مفاعلات الجيل الرابع*

تحسين الكرة مقابل LWR	الكفاءة الحرارية (٪)	دورة الطاقة	درجة حرارة المخرج (°م)	سائل التبريد	نوع المفاعل
خط الأساس	٣٢-٣٤	رانكين (ستيم)	٢٨٥-٣١٠	الماء	PWR/BWR
+٢١-٢٧٪	٤٠-٤٢	رانكين (ستيم)	٥٥٠	الصوديوم	SFR
+٢٧-٣٣٪	٤٢-٤٤	رانكين (ستيم)	٥٥٠-٦٥٠	الرصاص/ال LBE	LFR
+٣٣-٣٦٪	٤٤-٤٥	رانكين المباشر	٥٠٠-٦٢٥	المياه فوق الحرجة	SCWR
+٣٦-٣٩٪	٤٤-٤٦	رانكين/برايتون	٦٥٠-٧٥٠	الملح المنصهر	MSR
+٤٥٪	٤٨	دايركت برايتون	٨٥٠	الهيليوم	GFR
+٥٢٪	٥٠	دايركت برايتون	٩٠٠-٩٥٠	الهيليوم	VHTR

المصادر: *تم تجميعها من بيورو وآخرون (٢٠٢٣)، جاد بريغز & بيليديس (٢٠١٦)، أوكا (٢٠٢٣)، فورسبرغ (٢٠٢٢)، أغبيفانو وآخرون (٢٠٢٣)*

تظهر البيانات تحسينات كبيرة في الكفاءة تتراوح من ٢١٪ للأنظمة المبردة بالصوديوم إلى ٥٢٪ للمفاعلات ذات درجات الحرارة العالية جدا مقارنة بالمركبات التقليدية لمياه السحب الحرارة. تحقق الأنظمة القائمة على الصوديوم والرصاص تحسينات معتدلة (كفاءة ٤٠-٤٤٪) من خلال ظروف بخار مرتفعة مع الحفاظ على تقنية دورة رانكين المثبتة (أغبڤانو وآخرون، ٢٠٢٣؛ تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥). تصل أنظمة المياه فوق الحرجة وأنظمة الملح المنصهر إلى ٤٤-٤٦٪ من خلال معلمات البخار المتقدمة أو دورات محتملة لدرجات الحرارة العالية (أوكا، ٢٠٢٣؛

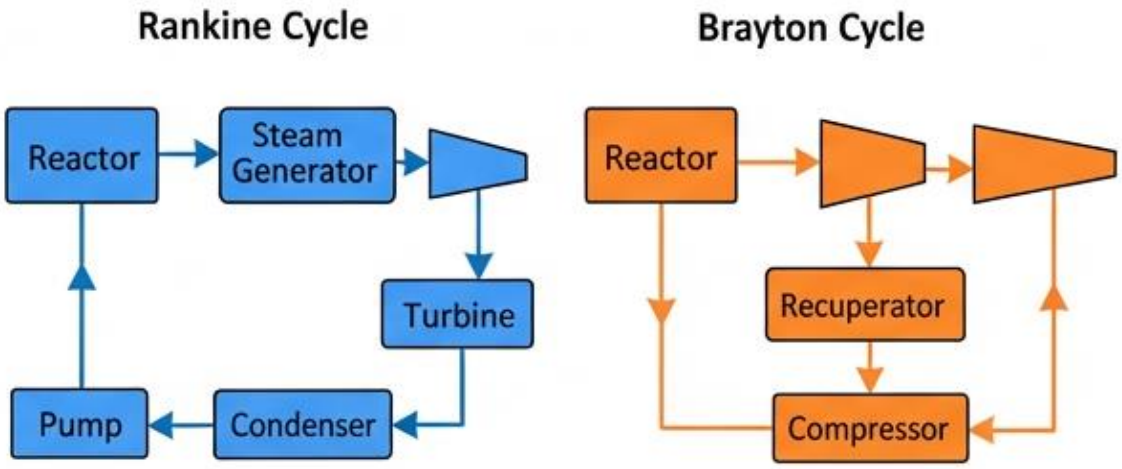
فورسبرغ، ٢٠٢٢). تحقق المفاعلات المبردة بالهيليوم أعلى الكفاءة (٤٨-٥٠٪) من خلال تمكين تشغيل دورة برايتون مباشرة عند درجات حرارة عالية جدا (جاد بريغز وبيليديس، ٢٠١٦؛ ناغاتسوكا وآخرون، ٢٠٢٤).

بعيدا عن توليد الكهرباء، تمكن درجات الحرارة العالية للمخارج من تطبيقات التوليد المشترك لإنتاج الطاقة والحرارة العملية للاستخدامات الصناعية بما في ذلك إنتاج الهيدروجين، وتخليق الوقود الصناعي، وتصنيع الصلب، والمعالجة الكيميائية، مما قد يحقق استهلاكا إجماليا للطاقة يتجاوز ٨٥٪ (الزرير وآخرون، ٢٠٢٢؛ هو وآخرون، ٢٠٢٤).

٣,٢ دورات الديناميكا الحرارية المتقدمة

تستخدم مفاعلات الجيل الرابع دورات ديناميكية حرارية مبتكرة محسنة للعمل في درجات حرارة عالية. دورة برايتون، التي تستخدم تدفق الغاز المستمر عبر ترتيبات الضاغط والتوربين، تحقق كفاءة فائقة عند درجات حرارة مرتفعة تميز المفاعلات المبردة بالهيليوم (جاد بريغز وبيليديس، ٢٠١٦). تلغي تكوينات الدورة المباشرة مولدات البخار والمبادلات الحرارية الوسيطة، مما يقلل من تكاليف رأس المال ويبسط الصيانة مع تحسين الكفاءة الحرارية من خلال تقليل خسائر نقل الحرارة (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥).

تقدم دورات ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج (sCO_2) فوائد كبيرة من خلال العمل عند ضغط عالي (٢٠-٣٠ ميغاباسكال) ودرجات حرارة عالية (٥٥٠-٧٥٠°م) مناسبة جدا لمفاعلات الصوديوم والرصاص والمبردة بالملح المنصهر (بيتروسكي وآخرون، ٢٠٢١). تتميز دورة sCO_2 بآلات توربينية مدمجة بسبب كثافة CO_2 العالية في الحالة فوق الحرجة، مما قد يقلل من حجم المعدات وتكلفتها بمقدار ٥-١٠ أضعاف مقارنة بالتوربينات البخارية ذات الطاقة المكافئة. تحقق تكوينات إعادة الضغط كفاءة حرارية تتجاوز ٤٥٪ عند اقترانها بمصادر حرارة مفاعلات متقدمة (بيتروسكي وآخرون، ٢٠٢١).



الشكل ٣. *مقارنة دورات طاقة رانكين وبرايتون في مفاعلات الجيل الرابع*

يقارن هذا الرقم دورات تحويل الطاقة رانكين وبرايتون التي تستخدم عادة في أنظمة مفاعلات الجيل الرابع. دورة رانكين، التي تستخدم عادة مع الصوديوم والرصاص ومفاعلات المياه فوق الحرجة، تعتمد على توليد البخار والتكثف، في حين أن دورة برايتون، التي يتم تبنيها بواسطة تبريد الهيليوم، تعمل كدورة غاز مباشرة دون تغيير في الطور. يوفر تكوين برايتون كفاءة حرارية أعلى، وتخطيط نظام أبسط، وتقليل خسائر نقل الحرارة عند درجات الحرارة المرتفعة. تبرز هذه المقارنة أهمية مطابقة اختيار سائل التبريد مع دورة تشغيل مناسبة لتعظيم أداء النظام بشكل عام.

تمكن الدورات الهجينة التي تجمع بين عناصر رانكين وبرايتون مفاعلات الملح المنصهر من استخراج أقصى طاقة حرارية مع منع تجميد الملح خلال مراحل التشغيل ذات درجات الحرارة المنخفضة (فورسبرغ، ٢٠٢٢). تعمل هذه الأساليب المتكاملة على تحسين تحويل الطاقة عبر ظروف تشغيل متنوعة، مما يعزز مرونة المحطة بشكل عام واقتصادياتها.

٤. ميزات السلامة السلبية

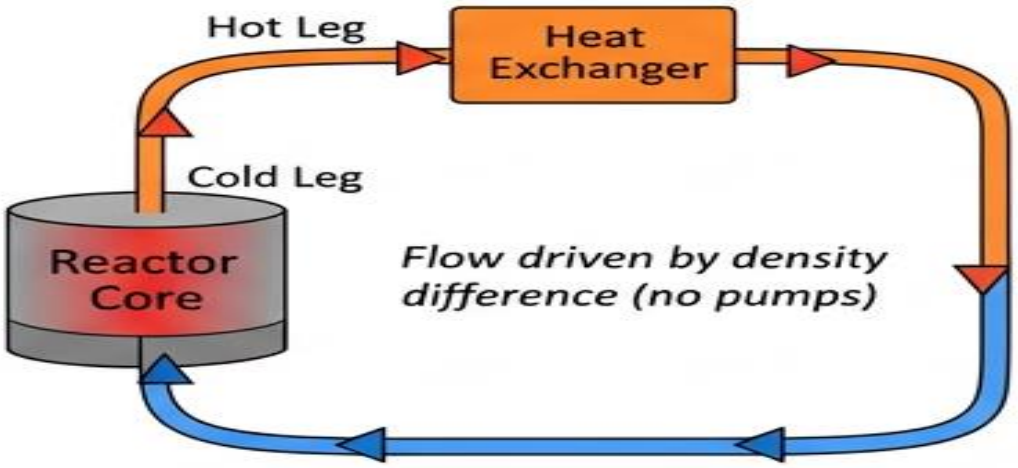
٤,١ آليات السلامة الجوهرية

تدمج مفاعلات الجيل الرابع أنظمة أمان سلبية تعتمد على الظواهر الفيزيائية الطبيعية بدلا من المكونات النشطة التي تتطلب طاقة خارجية أو إجراءات من المشغل (هاشم وآخرون، ٢٠٢٤). ميزة حاسمة هي التغذية الراجعة السلبية للتفاعل، خاصة في المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم وأنظمة الملح المنصهر، حيث تقلل زيادات درجة الحرارة تلقائيا من التفاعل من خلال توسيع دوبلر في تقليل كثافة الوقود والمبرد، مما يبطئ تفاعلات الانشطار دون إدخال قضيب التحكم (أغبيفانو وآخرون، ٢٠٢٣؛ فورسبرغ وآخرون، ٢٠١٩).

تعمل عمليات الضغط الجوي في أنظمة الصوديوم والرصاص والملح المنصهر على القضاء على مخاوف فقدان سائل التبريد التي تميز المفاعلات المبردة بالماء عالية الضغط (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥؛ بارنز وآخرون، ٢٠١٩). هوامش الغليان الهائلة—حوالي ٣٣٠°م للصوديوم، >١٠٠٠°م للرصاص/LBE، و>٧٠٠°C للأملاح المنصهرة فوق درجات حرارة التشغيل—تمنع تماما غليان المبرد حتى أثناء الحوادث الخطيرة (Agbevanu وآخرون، ٢٠٢٣؛ هاشم وآخرون، ٢٠٢٤؛ فورسبرغ، ٢٠٢٢).

تعد قدرة الدوران الطبيعي ميزة أمان سلبية أساسية في مفاعلات الجيل الرابع من النووي، حيث تتيح إزالة الحرارة بفعالية من التحلل عبر تدفق سائل التبريد المدفوع بالكثافة دون الاعتماد على المضخات أو مصادر الطاقة الخارجية أو تدخل المشغل. بعد إيقاف المفاعل أو فقدان التبريد النشط، تولد تدرجات الحرارة بين نواة المفاعل ومناطق رفض الحرارة قوى طفو تحافظ على دوران المبرد وتنقل الحرارة المتبقية بعيدا عن الوقود. هذه الآلية فعالة بشكل خاص في المفاعلات المبردة بالرصاص والرصاص-البزموت (LBE) بسبب كثافة المبرد العالية جدا لديها، والتي تزيد تقريبا بعشرة أضعاف كثافة الصوديوم. تنتج الفروق الكبيرة في الضغط الهيدروستاتيجي دورانا طبيعيا قويا ومستقرا، مما يضمن إزالة حرارة موثوقة تحت سيناريوهات فقدان التدفق غير المحمي، وفقدان مشتت الحرارة، واحتكاك المحطات. أظهرت التحقيقات العددية والتجريبية أن الأنظمة المعتمدة على الرصاص تحافظ على معدلات تدفق وهوامش حرارية كافية حتى في ظروف التشغيل الصعبة، بينما تلغي نقطة الغليان العالية جدا لمبردات الرصاص تماما خطر تغير طور المبرد، مما يعزز استقرار النظام وسلامته (لو وآخرون، ٢٠٢٣؛ هاشم وآخرون، ٢٠٢٤).

في مفاعلات الملح المنصهر، يتم إزالة الحرارة بالتحلل السلبي من خلال مزيج من الدوران الطبيعي وآليات السلامة المدفوعة بالجاذبية التي تعزز بشكل كبير سلامة المفاعلات الكامنة في المفاعل. تتضمن العديد من تصاميم مفاعلات الملح المنصهر أنظمة سدادات تجميد تقع في قاع وعاء المفاعل، والتي يتم تبريدها بنشاط أثناء التشغيل العادي. في حالة ارتفاع درجة الحرارة أو فقدان الطاقة، تذوب سدادة التجميد، مما يسمح لملح الوقود السائل بالتدفق بالجاذبية إلى خزانات تفريغ هندسية تحت الحرجة مصممة للتبريد السلبي بكفاءة. تضمن هذه العملية إيقاف تفاعل الانشطار بسرعة وإزالة الحرارة بالتحلل طويل الأمد دون الحاجة إلى أنظمة ميكانيكية أو تحكم خارجي. تدعم السعة الحرارية العالية والضغط التشغيلي المنخفض لمبردات الملح المنصهر الدوران الطبيعي المستقر والقصور الحراري، مما يمنع الانحرافات السريعة في درجات الحرارة أثناء الانتقالات. أكدت تحليلات السلامة المكثفة أن أنظمة الصرف المدفوعة بالجاذبية هذه توفر استجابة قوية وآمنة للحالات الشديدة للحوادث، مما يقضي فعليا على احتمال تلف النواة (فورسبيرغ وآخرون، ٢٠١٩).



الشكل ٤. *آلية إزالة الحرارة بالدوران الطبيعي السلبي في مفاعلات الجيل الرابع*

يقدم هذا الشكل مخططا مبسطا للدوران الطبيعي السلبي المستخدم لإزالة حرارة التحلل في مفاعلات الجيل الرابع. تعتمد الآلية على فروق الكثافة بين مناطق المبرد الساخن والبارد لتحريك الدوران دون الحاجة إلى مضخات أو طاقة خارجية. تعد هذه القدرة السلبية على إزالة الحرارة حجر الأساس للسلامة المتأصلة في تصاميم المفاعلات المتقدمة، خاصة في أنظمة المعادن السائلة والملح المنصهر. من خلال القضاء على الاعتماد على المكونات النشطة، يعزز الدوران الطبيعي موثوقية النظام أثناء سيناريوهات الحوادث ويضمن استمرار إزالة الحرارة في ظروف فقدان الطاقة.

الجدول ٢ : *خصائص السلامة للمفاعلات المتقدمة*

تصاميم أمثلة	ميزات السلامة السلبية	نوع المفاعل
NuScale، GEH-BWRX، Holtec	القوى الطبيعية (ضغط الغاز، جاذبية الماء) لإزالة الحرارة من التحلل طويل الأمد	LWR صغير معياري
GE-Prism، تيرا باور-ناتريوم	تغذية راجعة التفاعل السلبية للطاقة؛ ضغط منخفض مع مخزون كبير من المسابح؛ إزالة الحرارة بالتحلل الدوران الطبيعي	مفاعل الصوديوم السريع
إكس-إنرجي Xe-100	التغذية الراجعة السلبية للتفاعل في درجة الحرارة؛ كثافة طاقة منخفضة مع كتلة حرارية عالية؛ التبريد بالدوران الطبيعي	مفاعل الغاز عالي الحرارة
ستار، بريست، ألفريد	الخمول الكيميائي؛ هامش غليان هائل (>١٠٠٠°C)؛ دوران طبيعي قوي	مفاعل الرصاص السريع
IMSR، ThorCon، مشتقة من MSRE	الضغط الجوي؛ تصريف التجميد إلى خزانات التفريغ؛ معاملات درجة الحرارة السالبة القوية	مفاعل الملح المنصهر

المصدر: *مقتبس من الأكاديميات الوطنية للعلوم (٢٠٢٣)*

٤,٢ دراسات حالة أداء السلامة

حلل هاشم وآخرون (٢٠٢٤) استجابة المفاعل المبرد بالكهرباء الباردة خلال الانتقالات غير المحمية، وأظهروا أن معاملات التغذية الراجعة السلبية القوية إلى جانب دوران طبيعي قوي تحد من درجات حرارة الوقود الذروة إلى قيم آمنة (<٧٠٠°م) أقل بكثير من عتبات الضرر خلال جميع سيناريوهات الحوادث التي تم تحليلها. تؤدي الخمول الكيميائي لل LBE إلى إلغاء تفاعلات نوع الصوديوم والماء، بينما يسمح التكيف مع فشل التغطية بدون تلوث كبير بسائل التبريد باستمرار التشغيل أو إيقاف الإيقاف المنظم بعد فشل وقود.

وثق ناغاتسوكا وآخرون (٢٠٢٤) اختبارات فقدان التبريد القسرية من HTTR تؤكد السلامة السلبية. بعد إيقاف الدوران، امتص المعدل/العاكس الضخم للجرافيت (حوالي ٥٠٠ طن) حرارة التحلل بينما كانت أنظمة تبريد تجويف المفاعل السلبية تزيل الحرارة عبر الحمل الحراري الطبيعي والإشعاع. ظلت درجات حرارة الوقود القصوى أقل من ٩٥٠°م طوال الفترة العابرة — ضمن قدرة وقود TRISO (>1600°م) — مما يدل على أن التصميم الصحيح يتيح السلامة السلبية الكافية رغم ضعف سعة حرارة الهيليوم.

طور فورسبيرغ وآخرون (٢٠١٩) أنظمة إزالة الحرارة المتحللة لمفاعلات الملح المنصهر، مما يمنع تجمد المبرد مع ضمان التبريد السلبي. يستخدم هذا النهج أنظمة تبريد تجويف مفاعل مباشرة (DRACS) تستخدم الدوران الطبيعي عبر مبادلات حرارية خارجية مرتبطة بمشتتات هواء جوية. تشمل الحماية من التجمد التسخين الناري، والحفاظ على درجات الحرارة الدنيا في مسارات إزالة الحرارة، وأنظمة تصريف آمنة تسمح بتصريف الجاذبية إلى خزانات التخزين المدفأة إذا كان التجمد مهددا. أكدت الدراسة إزالة الحرارة الموثوقة للتحلل السلبي مع الحفاظ على جميع الأملاح فوق نقاط الانصهار خلال السيناريوهات المتوقعة.

٥. استخدام الوقود والاستدامة

٥,١ التكاثر ودورات الوقود المغلقة

تحقق المفاعلات السريعة الطيفية التي تدعم مبردات غير معتدلة (الصوديوم، الرصاص، الهيليوم في GFR) نسب تكاثر تتجاوز الوحدة، منتجة مواد انشطارية أكثر مما تستهلك مع حرق الأكتينيدات طويلة العمر في الوقت نفسه (Adamov وآخرون، ٢٠٢٢؛ تاك وآخرون، ٢٠١٥). تمثل هذه القدرة موارد اليورانيوم بمقدار ٥٠-١٠٠ أضعاف مقارنة بدورات الوقود التقليدية لدورة المياه المنخفضة التي تستهلك حوالي ١٪ من محتوى طاقة اليورانيوم الطبيعي (Agbevanu وآخرون، ٢٠٢٣).

أظهر تاك وآخرون (٢٠١٥) جدوى التشغيل فائق الدورة الطويلة (>١٠ سنوات بين إعادة التزود بالوقود) للمفاعلات السريعة المدمجة المبردة بالمعادن السائلة، مما أظهر أن الوقود المعدني المتقدم يمكنه تحقيق احتراق يتجاوز ٣٠٪ (>٢٠٠ جيجاوات/تيهرمون) دون فشل في التغليف عند تصميمه بشكل صحيح. حددت الأبحاث مواد التغليف المقاومة للإشعاع، وتركيبات الوقود المحسنة التي تستوعب توليد غازات الانشطار العالي، واستراتيجيات الإدارة الحرارية التي تمنع درجات الحرارة الزائدة أثناء الإشعاع الممتد كعوامل حاسمة.

تعمل المفاعلات السريعة في دورات وقود مغلقة مع إعادة المعالجة، وتستفيد من >٥٠-٦٠٪ من محتوى طاقة اليورانيوم الطبيعي—مما يمثل تحسنا بنسبة ٥٠-٦٠× مقارنة بالدورات المرة واحدة (Adamov وآخرون، ٢٠٢٢). هذا التكاثر في الموارد يمدد إمدادات اليورانيوم من عقود إلى آلاف السنين، مع تمكين حرق الأكتينيدات الذي يقلل بشكل كبير من متطلبات مستودعات النفايات من خلال القضاء على اليورانيك طويل العمر (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥).

٥,٢ مرونة وقود مفاعل الملح المنصهر

درس تشوي وآخرون (٢٠٢٢) مرونة دورة الوقود لمفاعل الملح المنصهر المتكامل (IMSR®)، وأظهروا أن تكوين الوقود السائل يمكن من استراتيجيات متنوعة قابلة للتكيف مع بيئات السياسات المتنوعة. يحقق التشغيل مرة واحدة مع اليورانيوم المخصب حرقا يتجاوز ١٠٠ جيجاوات يوم/تيلهام مع معالجة قليلة، وهو مناسب للولايات القضائية التي لا تحتوي على بنية تحتية لإعادة المعالجة. تكوينات إعادة التدوير الجزئي مع إزالة المنتجات الانشطارية عبر الإنترنت تمد مدة بقاء الوقود إلى ١٠-١٥ سنة، مما يقلل بشكل كبير من تكاليف الوقود. التشغيل الكامل في دورة مغلقة مع إضافة الوقود المستمر والمعالجة الكيميائية الشاملة يحقق استخداما شبه كامل للانشطار أثناء حرق المواد العابرة لليورانيك، مما يقلل عبء مستودعات النفايات (تشوي وآخرون، ٢٠٢٢).

كشفت الأبحاث أن تقنية MSR تستوعب الأطر التنظيمية المتطورة والظروف الاقتصادية من خلال تعديلات التصميم دون الحاجة إلى إعادة تصور أساسية للمفاعل، مما يمثل ميزة استراتيجية للنشر طويل الأمد في بيئات السياسات غير المؤكدة (تشوي وآخرون، ٢٠٢٢).

٦. توافق المواد وإدارة التآكل

٦,١ تحديات سائل التبريد المعدني السائل

تمثل مبردات المعادن السائلة تحديات كبيرة في توافق المواد وتتطلب حلولا مبتكرة. بالنسبة لأنظمة الصوديوم، تسرع شوائب الأكسجين من التآكل ويمكن أن تكون رواسب تعيق انتقال الحرارة (أغبڤانو وآخرون، ٢٠٢٣). تقوم أنظمة تنقية الفخاخ الباردة بإزالة الأكسجين باستمرار، مع الحفاظ على تركيزات أقل من ٢ جزء في المليون لضمان توافق المواد. تظهر الصلب الحديدية المتقدمة (HT-9، Mod 9Cr-1Mo) مقاومة أعلى للتآكل ونقل الكربون مقارنة بسبائك الأوستنيت (وانغ وآخرون، ٢٠٢٣).

تسبب مبردات الرصاص تآكل الذوبان وهشاشة المعادن السائلة عند درجات حرارة مرتفعة (>٥٠٠°م)، مما قد يسبب فشلا عند إجهادات أقل بكثير من قوة الخضوع الطبيعية (تشانغ، ٢٠١٣). أظهر تشو وآخرون (٢٠٢٤) أن التحكم النشط في الأكسجين من خلال الحفاظ على الأكسجين المذاب داخل نوافذ حماية ضيقة (١٠$^{-6}$ إلى ١٠$^{-5}$ وزن٪) يمكن تكوين طبقة أكسيد الحماية على الأسطح الفولاذية، مما يقلل من التآكل إلى معدلات مقبولة. تستخدم أنظمة التحكم في الأكسجين حقن الغاز أو خلايا إلكتروليتي أكسيد صلب، مما يحافظ على ظروف الحماية طوال الفترات التشغيلية العابرة (Zhu وآخرون، ٢٠٢٤).

استعرض تشانغ وآخرون (٢٠٢٥) التطورات في تصميم نواة المفاعل السريع المبرد بالرصاص، حيث حددوا سبائك المعززة بالتشتت بالأكسيد (ODS) والصلب الحديدي-المارتنسيتي المتقدم الذي يظهر مقاومة إشعاعية وأداء متفوق ضد التآكل كمشاريع مواد حيوية. ومع ذلك، لا يزال التأهيل طويل الأمد تحت ظروف الإشعاع الأولي ضروريا قبل النشر التجاري (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥).

٦,٢ تطوير المواد عالية الحرارة

يتطلب التشغيل بدرجات حرارة عالية في أنظمة الملح المبردة بالهيليوم والملح المنصهر مواد تتحمل درجات حرارة قصوى مع الحفاظ على السلامة الهيكلية. بالنسبة لأجهزة VHTR التي تعمل عند ٩٠٠-٩٥٠°C، توفر الجرافيت المتقدمة وظائف المعتدل/العاكس مع الحفاظ على الاستقرار البعدي تحت الإشعاع (Nagatsuka وآخرون، ٢٠٢٤). وقود الجسيمات المطلي بتقنية تريسو، مع وقود السيليكون المصنوع من السيليكون كوعاء ضغط صغير يحتوي على منتجات انشطار وكربون بيروليكي يوفر السلامة الهيكلية، يتيح التشغيل في درجات حرارة تتجاوز ١٦٠٠°م (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥).

تتطلب أملاح الفلورايد المنصهرة مواد هيكلية مقاومة للتآكل في البيئات الكيميائية العدوانية. هاستيلوي-N، وهي سبيكة نيكل-موليبدين-كروم تم تطويرها خصيصا لخدمة الملح المنصهر، تظهر مقاومة ممتازة للتآكل (<٥ ميكرومتر/سنة عند ٧٠٠°م) عند التحكم في الرطوبة والشوائب المؤكسدة (بارنز وآخرون، ٢٠١٩؛ فورسبرغ، ٢٠٢٢). ومع ذلك، ينتج تعريض النيوترونات الهيليوم من خلال تفاعلات التحول، مما يسبب هشاشة حدود الحبيبات مما يحد من عمر المكونات. تحسن التركيبات المعدلة التي تحتوي على إضافات النيوبيوم أو التيتانيوم مقاومة الهشاشة الناتجة عن الإشعاع عن طريق الحصول على حدود الحبيبات (بارنز وآخرون، ٢٠١٩).

تتطلب المياه فوق الحرجة عند ٦٢٥°C و٢٥ ميغاباسكال مواد ذات قوة كافية ومقاومة تآكل تتجاوز سبائك LWR التقليدية. تشمل المواد المرشحة الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستينيت المتقدم، والسبائك الفائقة القائمة على النيكل، والفولاذ الفيريتي-مارتنسيتي، رغم أن جميعها تتطلب التحقق من الصحة في ظروف نموذجية تجمع بين درجة الحرارة والضغط والإشعاع وكيمياء المياه (أوكا، ٢٠٢٣؛ هان وآخرون، ٢٠٢٣).

٧. الجدوى الاقتصادية والنشر

٧,١ اعتبارات رأس المال وتكاليف التشغيل

يؤثر اختيار المبرد المتقدم بشكل كبير على تكاليف رأس المال من خلال التأثيرات على حجم المكونات، ومتطلبات المواد، وتعقيد النظام. مبردات الضغط الجوي (الصوديوم، الرصاص، الأملاح المنصهرة) تلغي أوعية الضغط ذات الجدران السميكة المكلفة، مما قد يقلل من تكاليف رأس المال بنسبة ١٠-١٥٪، رغم الحاجة إلى مواد متخصصة للخدمة في درجات الحرارة العالية (وو، ٢٠٢٢). الأنظمة عالية الضغط (الهيليوم عند ٧-٩ ميغاباسكال،

والماء فوق الحرج عند ٢٥ ميجاباكال) تتطلب حدود ضغط قوية لكنها تستفيد من حجم المكونات المدمج (جاد بريغز & بيليديس، ٢٠١٦؛ أوكا، ٢٠٢٣).

الكفاءة الحرارية الفائقة للأنظمة المتقدمة (٤٠-٥٠٪ مقابل ٣٣٪ لأنظمة المياه المنخفضة الحديد) تعني انخفاض بنسبة ١٥-٣٠٪ في تكاليف الوقود لكل وحدة كهرباء مولدة، مما قد يعوض ارتفاع تكاليف رأس المال من خلال تحسين دورة الحياة (وو، ٢٠٢٢). يوفر تحسين استخدام الوقود في المفاعلات السريعة قيمة إضافية من خلال خدمات إدارة النفايات وتوسيع الموارد التي لم يتم توثيقها بالكامل في التحليلات الاقتصادية التقليدية (تاك وآخرون، ٢٠١٥).

تعكس تكاليف التشغيل متطلبات إدارة سائل التبريد بما في ذلك أنظمة التنقية، وحماية من التجميد، وصيانة توافق المواد. تتطلب أنظمة الصوديوم إزالة الأكسجين بشكل مستمر وتدفئة بالتجميد لكنها تستفيد من خبرة تشغيلية واسعة (أغبيفانو وآخرون، ٢٠٢٣). تتطلب أنظمة الرصاص تحكما نشطا في الأكسجين وإجراءات مناولة متخصصة (تشو وآخرون، ٢٠٢٤). تواجه أنظمة الهيليوم إدارة المخزون وتحديات محتملة للتلوث لكنها تتجنب تعقيدات التعامل مع المعادن السائلة (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥).

٧,٢ نضج التكنولوجيا ومسارات التطور

يختلف نضج التكنولوجيا بشكل كبير بين أنظمة المبردات، مما يؤثر على جداول النشر. تستفيد المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم من خبرة تشغيلية واسعة مع تحقيق عدة مفاعلات تجريبية تشغيلا ناجحا، مما يتيح نشر تصاميم تطورية على المدى القريب (أغبڤانو وآخرون، ٢٠٢٣). لقد تقدمت المفاعلات المبردة بالرصاص والLBE بشكل كبير مع مرافق تجريبية تعرض تقنيات رئيسية، رغم أن النشر التجاري يتطلب إكمال تأهيل المواد والتحقق من صحة المفاعلات التجريبية (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥؛ هاشم وآخرون، ٢٠٢٤).

تستفيد المفاعلات المبردة بالغاز عالية الحرارة من تشغيل HTTR الناجح ومشاريع العرض المخطط لها، مع توقع النشر التجاري لعام ٢٠٣٠ (ناغاتسوكا وآخرون، ٢٠٢٤). لا تزال المفاعلات السريعة المبردة بالغاز في مراحل تطوير مبكرة تتطلب استمرار البحث حول التبريد الطارئ والتأهيل للوقود، مع امتداد التسويق حتى عام ٢٠٤٠ أو ما بعده (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥).

تتطلب مفاعلات الملح المنصهر تطويرا كبيرا يتناول تأهيل المواد، وعرض معالجة المواد الكيميائية، والقبول التنظيمي رغم نجاح تشغيل MSRE في الستينيات (Barnes وآخرون، ٢٠١٩؛ فورسبرغ، ٢٠٢٢). تسعى عدة شركات إلى تسويق MSR بطرق متنوعة، رغم أن النشر القريب يواجه تحديات تتطلب حلا من خلال برامج العرض (تشوي وآخرون، ٢٠٢٢).

الجدول ٣: *فجوات جاهزية التكنولوجيا والتطوير*

الفجوات التقنية الرئيسية	جاهزية التكنولوجيا	نوع المفاعل
تأهيل وقود عالي الاحتراق؛ سبائك متقدمة لنوى التكاثر/الحرق	عالي (خبرة تشغيلية)	مفاعل الصوديوم السريع
مؤهل المواد طويلة الأمد؛ موثوقية نظام التحكم بالأكسجين	متوسط-عالي	مفاعل الرصاص السريع
تأهيل الوقود والجرافيت لمصنع العرض	متوسط إلى عالي (<١١٠٠ كيلوبايت)	HTGR (هيليوم)
التحقق من التبريد الطارئ؛ تأهيل الوقود السيراميكي المعدني	منخفض-متوسط	GFR (الهيليوم)
تأهيل المواد تحت ظروف نموذجية؛ تصميم التبريد الطارئ	متوسط	SCWR
مواد للخدمة لمدة ٣٠-٤٠ سنة؛ عرض المعالجة الكيميائية	منخفض-متوسط	MSR

المصدر: *مقتبس من الأكاديميات الوطنية للعلوم (٢٠٢٣) وأدبيات مراجعة*

٨. التحديات والاتجاهات المستقبلية

٨,١ تحديات التنفيذ الفني

يواجه إدخال المبردات عالية الكفاءة تحديات تقنية بسبب المتطلبات التشغيلية الفريدة والتفاعلات المادية. لا تزال توافق المبرد مع المواد الهيكلية للمفاعل أمرا بالغ الأهمية—فيمكن أن يسبب الليد-بيسموت اليوتكتيكي التآكل والهشاشة التي تتطلب طبقات أكسيد واقية وسبائك متقدمة (Zhu et al., 2024). تسرع درجات الحرارة التشغيلية الأعلى من تدهور المادة، مما يستلزم اختبارا صارما تحت التعرض المشترك للإشعاع ودرجة الحرارة والمواد الكيميائية (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥).

تتطلب أنظمة التبريد المتقدمة أجهزة مراقبة محسنة، وتتبع تدفق النيوترونات، وكيمياء المبرد، وسلامة الهيكل في الوقت الفعلي. غالبا ما تفشل أجهزة الاستشعار الحالية عند درجات حرارة عالية (>٧٠٠°م)، مما يجعل تطوير تشخيصات موثوقة في درجات الحرارة العالية أمرا ضروريا (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥). تطرح الأطر التنظيمية تحديات إضافية حيث تركز القواعد الحالية بشكل أساسي على مفاعلات المياه الخفيفة، مما قد يؤخر الموافقة على التصاميم الجديدة التي تتطلب معايير تقييم جديدة (أوكا، ٢٠٢٣).

٨,٢ تطوير المواد والابتكار

توفر المواد الناشئة مسارات تعالج القيود الحالية. تظهر سبائك الفولاذ الحديدية المارتنسية المتقدمة وسبائك التشتت بالأكسيد (ODS) مقاومة إشعاع فائقة وقوة عالية الحرارة، مما يمكن من تمديد أعمار المكونات (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥). تتحمل مركبات المصفوفة السيراميكية (CMCs) حرارة شديدة مع توفير قوة ميكانيكية تفوق المعادن التقليدية، وهي مناسبة لتطبيقات المفاعلات المبردة بالغاز وملح منصهر في درجات الحرارة العالية (كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥).

تحمي الطلاءات النانوية الهيكلية قنوات المبرد من التآكل من خلال تشكيل حواجز واقية، مع إمكانية تمديد عمر الخدمة من خلال الشفاء الذاتي (شير، ٢٠٢٢). تمكن تقنية التوأم الرقمي النمذجة الفورية لسلوك المواد، مما يسهل الصيانة التنبؤية وتحسين التشغيل (لي وآخرون، ٢٠٢٤). تطور أبحاث تعاونية طرق اختبار تحاكي ظروف المفاعل من الجيل الرابع لضمان أداء موثوق وطويل الأمد قبل النشر التجاري (شير، ٢٠٢٢).

٨,٣ تكامل النظام وتحسينه

يركز التطوير المستمر على تحسين النظام المتكامل الذي يوازن بين الكفاءة الحرارية، والسلامة، والاقتصاد، والاستدامة. أظهر وو وآخرون (٢٠٢٢) أن مناهج التعلم الآلي تتنبأ بدقة بالمعلمات الحرارية-الهيدروليكية بكفاءة حسابية تتجاوز الطرق التقليدية بمراتب كبير، مما يمكن من تحسين العمليات في الوقت الحقيقي. لونغ (٢٠٢٢) قام بدمج الاقتران الفيزيائي المتعدد المتقدم الذي دمج النيوترونيات والهيدروليكيات الحرارية والميكانيكا الهيكلية، حيث التقط التفاعلات المعقدة التي تؤثر على أداء المفاعل.

حلل الزرير وآخرون (٢٠٢٢) و هو وآخرون (٢٠٢٤) التكامل مع أنظمة إنتاج الهيدروجين، وأظهروا أن المفاعلات ذات درجات الحرارة العالية تمكن دورات كيميائية حرارية فعالة تنتج هيدروجين خال من الكربون للنقل والتطبيقات الصناعية. أثبت فورسبرغ وبيترسون (٢٠١٦) جدوى دمج تخزين الطاقة الحرارية، مما يتيح إنتاج الكهرباء المتغير من طاقة المفاعلات المستمرة، ومعالجة تحديات التقطع في الطاقة المتجددة مع تعظيم عوامل القدرة على المحطات النووية.

٩. الاستنتاجات

تمكن مبردات الكفاءة المتقدمة عالية الكفاءة تحسينات تحول في أداء مفاعلات الجيل الرابع النووية من حيث الكفاءة الحرارية، واستهلاك الوقود، وخصائص السلامة، والمرونة التشغيلية. تمثل الكفاءات الحرارية التي تتراوح بين ٤٠-٤٢٪ للأنظمة المبردة بالصوديوم إلى ٤٨-٥٠٪ للمفاعلات ذات درجات الحرارة العالية جدا تحسينات بنسبة ٢١-٥٢٪ مقارنة بالمفاعلات التقليدية بالماء الخفيف، مما يترجم مباشرة إلى تقليل استهلاك الوقود وتوليد الهدر لكل وحدة كهرباء منتجة (جاد بريغز & بيليديس، ٢٠١٦؛ بيورو وآخرون، ٢٠٢٣).

تحقق المفاعلات سريعة الطيف المدعومة بالمعادن السائلة ومبردات الغاز حرق وقود يتراوح بين ١٠٠-٢٠٠ جيجاواط يوم/تيترامولتر وتستفيد من >٥٠-٦٠٪ من محتوى طاقة اليورانيوم الطبيعي من خلال التربية—مما يمثل تحسنا بنسبة ٥٠-٦٠× مقارنة بالدورات التقليدية المجردة—مما يمدد إمدادات اليورانيوم من عقود إلى آلاف السنين، مع تمكين حرق الأكتينيدات مما يقلل بشكل كبير من متطلبات مستودعات النفايات (آدموف وآخرون، ٢٠٢٢؛ تاك وآخرون، ٢٠١٥؛ تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥).

تعمل عمليات الضغط الجوي مع هوامش غليان هائلة (>٣٠٠°م للصوديوم، >١٠٠٠°م للرصاص/LBE، >٧٠٠°C للأملاح المنصهرة) تقضي على مخاوف فقدان سائل التبريد مع تمكين دوران طبيعي قوي لإزالة الحرارة السلبية من التحلل (Agbevanu وآخرون، ٢٠٢٣؛ هاشم وآخرون، ٢٠٢٤؛ فورسبرغ وآخرون، ٢٠١٩). توفر معاملات التفاعل السلبية القوية لدرجة الحرارة قدرة إيقاف المحرك أثناء الانتقالات دون الحاجة إلى أنظمة تحكم نشطة أو تدخل المشغل (فورسبرغ، ٢٠٢٢).

تمكن درجات الحرارة العالية من المخارج تطبيقات تتجاوز توليد الكهرباء بما في ذلك تسخين العمليات الصناعية، وإنتاج الهيدروجين، وتخليق الوقود الصناعي، مما قد يحقق استهلاكا إجماليا للطاقة يتجاوز ٨٥٪ مع إزالة الكربون بشكل عميق للقطاعات الصناعية (الزرير وآخرون، ٢٠٢٢؛ هو وآخرون، ٢٠٢٤؛ ناغاتسوكا وآخرون، ٢٠٢٤).

ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات تشمل تأهيل المواد في ظروف نموذجية، وتطوير الإطار التنظيمي للتصاميم الجديدة، وعرض التكنولوجيا الذي يتحقق من أداء النظام المتكامل (تشانغ وآخرون، ٢٠٢٥؛ كفيزدا وآخرون، ٢٠٢٥؛ أوكا، ٢٠٢٣). يعتمد اختيار سائل التبريد الأمثل على متطلبات التطبيق المحددة، حيث يوفر الصوديوم أقل مخاطر تقنية، ويوفر الرصاص/الحمض النووي خصائص أمان متفوقة، ويوفر الهيليوم أعلى كفاءة حرارية، ويوفر الأملاح المنصهرة مرونة فريدة في دورة الوقود (Adamov وآخرون، ٢٠٢٢).

يتطلب نشر الجيل الرابع الناجح جهودا مستمرة في تطوير المواد، وعرض النظام، والمشاركة التنظيمية، وبناء ثقة أصحاب المصلحة من خلال تقييم السلامة الشفاف وعرض الفوائد البيئية. إن التحول من أنظمة المفاعلات التقليدية إلى أنظمة المفاعلات المتقدمة التي تستخدم مبردات عالية الكفاءة يضع الطاقة النووية كمكون أساسي لمستقبل

الطاقة المستدامة ومنخفضة الكربون التي تعالج تغير المناخ مع تلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة (بيورو وآخرون، ٢٠٢٣؛ شولنبرغ، ٢٠٢٢).

المراجع

آدموف، إ.، وآخرون (٢٠٢٢). مقارنة متبادلة بين مفاهيم المفاعلات السريعة مع أنواع مختلفة من المبردات. *الهندسة النووية والتصميم*.

أغبيفانو، ك. ت.، ديبرا، س. ك.، آرثر، إي. إم.، & شيتسي، إ. (٢٠٢٣). تطوير أبحاث هيدروليكية حرارية سريعة المبردة بالمعادن السائلة: مراجعة. *هيليون*، *٩* (٦)، e16580. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16580

الزارير، م.، دينسر، إ.، & روزن، م. أ. (٢٠٢٢). تحليل وتقييم المفاعل النووي السريع المبرد بالغاز من الجيل الرابع المتكامل ودورة النحاس-الكلور لإنتاج الهيدروجين والكهرباء. *تحويل الطاقة وإدارتها*.

بارنز، ج. وآخرون (٢٠١٩). توصيف الأملاح المنصهرة لتطبيقها على مفاعلات الملح المنصهر. *مراجعة PAM للعلوم والتكنولوجيا للطاقة*. https://doi.org/10.5130/pamr.v6i0.1546

تشوي، ج.، إيفانوفا، م.، لوبلانك، د.، موهابترا، س.، وروبنسون، ر. (٢٠٢٢). مرونة دورة الوقود لمفاعل الملح المنصهر المتكامل التابع لشركة ENERGY (IMSR®) الأرضية. *وقائع المؤتمر*.

فورسبرغ، سي. (٢٠٢٢). المفاعل المتقدم عالي الحرارة: وقود عالي الحرارة، مبرد الملح السائل، مصنع مفاعل معدني سائل. *التقدم في الطاقة النووية*.

فورسبرغ، سي.، & بيترسون، ب. ف. (٢٠١٦). أساس المفاعلات عالية الحرارة المبردة بملح الفلورايد مع دورات برايتون النووية المركبة وتخزين الطاقة الساخنة بمقاومة الطوب. *تكنولوجيا نووية*. https://doi.org/10.13182/nt16-28

فورسبرغ، سي.، وآخرون (٢٠١٩). مفاعل الحرارة العالية المبرد بالملح بالفلورايد (FHR) يستخدم تقنية إعادة التزود بالوقود المتقدمة البريطانية (AGR) وأنظمة إزالة الحرارة التي تمنع تجميد الملح. *تكنولوجيا نووية*. https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1586372

جاد بريغز، أ.، & بيليديس، ب. (٢٠١٦). تحليلات لدورات توربينات غاز برايتون الهيليوم المباشرة المستعادية البسيطة والمبردة بداخلها لمحطات طاقة مفاعلات الجيل الرابع. *مجلة الهندسة النووية وعلوم الإشعاع*. https://doi.org/10.1115/1.4033398

هان، ج.-دبليو، وآخرون (٢٠٢٣). الأداء الحراري-الهيدروليكي لتجمعات وقود المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج. *الهندسة النووية والتصميم*.

هاشم، م.، تساو، ل.، وو، ه.، جيا، إكس.، وانغ، ج.، رضا، س. أ.، & فان، ح. (٢٠٢٤). تقييم الأداء الحراري-الهيدروليكي والسلامة لمفاعل مبرد ب LBE تحت الانتقالات المستقرة وغير المحمية. *حوليات الطاقة النووية*، *٢٠٩*، ١١٠٨٣٣ https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110833

هو، ي.، تشين، ب.، جين، ي.، تشانغ، سي.، لي، و.، جاو، سي.، & شيانغ، ي. (٢٠٢٤). تحليل أداء لمفاعل صغير مبرد بالرصاص سريع مقترن بنظام إنتاج هيدروجين بدورة النحاس-كلوريد. *المجلة الدولية لطاقة الهيدروجين*. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.276

كفيزدا، ب.، بيبيجاك، س.، ماير، ج.، فاتشا، ب.، ميليشار، ت.، & دينغ، سي. (٢٠٢٥). تطوير تقنية المفاعلات السريعة المبردة بالغاز (FE) في نتائج مشروع Euratom SafeG حول أبحاث وتطوير ALLEGRO. *EPJ للعلوم والتقنيات النووية*، *١١*، ٢٥. https://doi.org/10.1051/epjn/2025021

لي، ج.، تشين، ه.، شاهيزان، م. أو.، & يوسف، ل. م. (٢٠٢٤). أنظمة ذكية لتحسين أداء سائل تبريد المفاعل. *الأنظمة الذكية مع التطبيقات*.

لونج، ب. (٢٠٢٢). *النمذجة والمحاكاة العددية لتحسين أداء مبرد المفاعل*. جامعة كانساس.

لو، د.، وي، إس.، وانغ، سي.، تيان، و.، سو، ج.، & تشيو، س. (٢٠٢٣). تحليل الخصائص الحرارية-الهيدروليكية لنظام مفاعل الرصاص-البسمث LESMOR تحت حركة المركبة. *علوم وتكنولوجيا الطاقة الذرية*، ٥٧(١)، ١١١–١٢٣. https://doi.org/10.7538/yzk.2022.youxian.0035

ناغاتسوكا، ك.، نوغوتشي، ه.، ناغاسومي، س.، نوموتو، ي.، شيميزو، أ.، ساتو، ه.، نيشيهارا، ت.، وساكابا، ن. (٢٠٢٤). الوضع الحالي لتطوير مفاعلات تبرد بالغاز بدرجات حرارة عالية في اليابان. *الهندسة النووية والتصميم*، ٤٢٥، ١١٣٣٣٨ https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113338

أوكا، ي. (٢٠٢٣). مراجعة أبحاث SCWR في اليابان. *آفاق في الطاقة النووية*، ٢، ١٢٧٢٧٦٦ https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1272766

بيتروسكي، ر.، وآخرون (٢٠٢١). تصميم مفاعل نووي فوق حرج مباشر بدورة مباشرة مع تعديل للمياه الثقيلة. *الهندسة النووية والتكنولوجيا*. https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.030

بيورو، آي. إل.، وآخرون (٢٠٢٣). *دليل المفاعلات النووية من الجيل الرابع* (الطبعة الثانية). إلسيفير.

شولنبرغ، ت. (٢٠٢٢). *الجيل الرابع من المفاعلات النووية: الأساسيات، الأنواع، والفوائد موضحة*. سبرينغر برلين هايدلبرغ.

شير، ف. (٢٠٢٢). *هندسة مستدامة ومواد متقدمة لتبريدات المفاعلات عالية الكفاءة*. جامعة نانيانغ التكنولوجية (NTU).

تاك، ت.، وآخرون (٢٠١٥). دراسة جدوى حول التشغيل فائق الطول وأداء المواد للمفاعلات السريعة المبردة بالمعادن السائلة المدمجة: عمل مراجعة. *المجلة الدولية لأبحاث الطاقة*. https://doi.org/10.1002/er.3384

وانغ، ب.، فنغ، ز.، تشين، ي.، تشانغ، د.، وو، ز.، لي، ج.، لي، م.، ما، ر.، & لي، سي. (٢٠٢٣). تحسين وتحسين كود تحليل المولدات البخارية المسخنة مرة واحدة بناء على خوارزمية JFNK. *الطاقات*، ١٦ (١)، ٤٨٢. https://doi.org/10.3390/en16010482

وو، ه.، لي، ر.، تشاو، ب.، يو، ت.، & تشاو، ي. (٢٠٢٢). بحث في طريقة التنبؤ بالمعلمات الحرارية-الهيدروليكية لنواة مفاعل الرصاص-بيسموت السريع الصغيرة بناء على شبكة عصبية RBF التكيفية. *آفاق في أبحاث الطاقة*، ١٠، ٨٥٢١٤٦ https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.852146

وو، ي. (٢٠٢٢). التصميم المفاهيمي وتحسين نظام توليد الطاقة لمفاعل قائم على الرصاص. *الهندسة الحرارية التطبيقية*.

يانغ، ي.، & زو، ي. (٢٠٢٥). تقييم الأداء الحراري-هيدروليكي للملح المنصهر في التدفق الطبقي مع تسخين داخلي موحد في أنبوب دائري. *الهندسة الحرارية التطبيقية*، ٢٦٨، ١٢٥٨٠٧ https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125807

تشانغ، سي.، تشين، ل.، تشانغ، ي.، & لي، س. (٢٠٢٥). التطورات واتجاهات التطوير في تصميم نواة المفاعلات السريعة المبردة بالرصاص. *العمليات*، ١٣ (٦)، ١٧٧٣. https://doi.org/10.3390/pr13061773

تشانغ، ج. (٢٠١٣). مفاعل الرصاص-بزموت اليوتكتيكي (LBE): مرشح لمبرد مفاهيم المفاعلات النووية المتقدمة من الجيل الرابع. *المواد الهندسية المتقدمة*. https://doi.org/10.1002/adem.201300296

تشو، ي.، وآخرون (٢٠٢٤). التحكم في الأكسجين وتحسين نقل الحرارة في المفاعلات السريعة المبردة بالرصاص. *الابتكار*.