1. مقدمة

عندما نتحدث عن وقود نووي، فإن معظم الناس في الصناعة النووية سيفكرون بكريات سوداء من السيراميك، مكونة من أكسيد اليورانيوم أو خليط من أكاسيد اليورانيوم والبلوتونيوم (موكس MOX)، ذات تخصيب من مرتبة ^{235}U 5% أو 7%Pu. هذا هو في الواقع الوقود المفضل لجميع مفاعلات الطاقة في العالم تقريباً (مفاعلات الماء الخفيف LWR). ومع ذلك، تتمّ تغذية معظم مفاعلات الأبحاث مع نوع مختلف من الوقود. تاريخياً، تمّ تطوير مفاعلات الأبحاث أساساً لسببين: توليد النترونات لاستخدامها في تجارب أنابيب الحزم beamline خارج المفاعل (مفاعلات أنابيب الحزمة، مثل RHF في ILL، في غرونوبل بفرنسا أو FRM-II في TUM، في ميونخ بألمانيا) أو توليد النترونات لتشعيع المواد في قلب المفاعل (مفاعلات اختبار المواد أو MTR، مثل BR2 في SCK•CEN، في Mol في بلجيكا أو FRM-II في ATR في INL، بإيداهو في أمريكا). وفي كلتا الحالتين، فإن الهدف الرئيس هو إنتاج أكبر عدد ممكن من النترونات في أصغر حيّز ممكن. والطريقة الأفضل لتحقيق ذلك هي زيادة تخصيب الوقود، وهذا هو السبب تاريخياً في تشغيل عدد كبير من مفاعلات الأبحاث بالوقود المخصّب (^{235}U >90%).

تختلف تصاميم الوقود من مفاعل إلى آخر (انظر الشكل 1)، ولكن يمكن أن تصنف على أنها من نمط الدبوس pin-type أو نمط اللوحة plate-type. ففي أوربة، تستخدم معظم مفاعلات الأبحاث وقوداً من نمط–لوحة، حيث يتمّ فيه ترتيب مجموعات من لوحات رقيقة (مسطّحة أو منحنية، تحتوي على مادة انشطارية، مرتبة في تجمعات (من نمط العلبة أو الأنبوب أو حتى من أنواع أكثر تعقيداً). معظم الوقود هو وقود مبدّد تكون فيه المواد الانشطارية مبدّدة في ركازة، غالباً ما تكون من الألمنيوم (عدا استثناءات قليلة، مثل الزركونيوم وهدريد الزركونيوم، وغير ذلك)، مع كساء من سبيكة الألمنيوم. وكانت المواد الانشطارية المستخدمة في الوقود العالي التخصيب من UO_X أو UAl_X بشكل أساسي. وللحصول على وقود مبدّد من نمط الدبوس (وبعض الأنماط الأنبوبية الروسية)، استعملت عملية البثق بالضغط extrusion لإنتاج هذا الوقود، في حين جرى تصنيع الوقود من نمط اللوحة باستعمال عملية الربط بلفافة ساخنة hot roll-bonding process. ففي عملية الربط بلفافة، يوضع تجمّع للوحة مغلفة تحيط بإطار صورة وضع فيه خليط مضغوط من خليط ركازة وقود ويرتب التجمع في لوحة الوقود في حجمها الكلي بحيث تتناوب أجزاؤها باردة وساخنة على التوالي. يسمى الجزء الوسطي من اللوحة، الذي يحتوي على المادة الانشطارية، «الحشوة meat» (انظر الشكل 2).

وبسبب المخاطر المرتبطة بانتشار المواد الانشطارية العالية التخصيب المستخدمة، بدأت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة برنامجاً للتخصيب المنخفض لمفاعلات الأبحاث والاختبار (RERTR) في عام 1978 من أجل الحدّ من الاستخدام المدني لليورانيوم العالي التخصيب ومن ثمّ استئصاله في آخر المطاف. كان الهدف الرئيس من هذا البرنامج، وما يزال، تطوير التقانة المطلوبة، بما في ذلك الوقود، لتحويل مفاعلات الأبحاث من اليورانيوم العالي التخصيب (HEU) إلى اليورانيوم المنخفض التخصيب (LEU). بطبيعة الحال، يطلب من مفاعلات الأبحاث تحقيق الأداء نفسه (في التدفق النتروني) مع اليورانيوم المنخفض التخصيب كما هو الحال مع اليورانيوم العالي التخصيب. وفي جوهره، يركز الهدف على زيادة تركيز اليورانيوم في الوقود من خلال خفض تخصيبه بحيث تبقى كثافة ^{235}U نفسها. يمكن تحقيق ذلك عن طريق زيادة نسبة الوقود إلى الركازة (يتضمن الوقود العالي التخصيب عادة ما قيمته 1.7 g_U/cm^3) أو تغيير مادة الوقود إلى مادة أخرى تحتوي على كثافة أعلى من اليورانيوم. وكمادة وقود بديلة، تمّ تطوير U_3Si_2 و U_3Si، وبفضل الأخير منهما فقط تمّ الوصول إلى القيود الأكثر أهمية وهي أن نمط الدبوس فرض نفسه كوقود، من خلال تخفيض الانتفاخ. جرى فحص لوحات وقود U_3Si_2 بتركيز وصل إلى 4.8 g_U/cm^3 مبدّد في الألمنيوم، ووجد أنه مستقر تحت الإشعاع في تشكيلات نمط اللوحة، الأمر الذي قاد في نهاية المطاف إلى تقرير حول تقييم السلامة NUREG-1313 صادر عن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في العام 1988، مما أدى إلى المصادقة على هذا الوقود للاستخدام العام. ومنذ ذلك الحين، تحول عدد كبير من مفاعلات الأبحاث إلى الوقود U_3Si_2 المنخفض التخصيب باليورانيوم-235، لكن بعض المفاعلات ما تزال حتى الآن غير قابلة للتخلص من الوقود العالي التخصيب دون أن تفقد من كفاءتها. توصّف هذه المقالة بشكل أساسي الجهود الحالية العاملة على تطوير الوقود المعتمد على سبيكة U(Mo) من أجل تحويل ما تبقى من مفاعلات التدفق العالي التي لا يمكنها حالياً التحول إلى اليورانيوم المنخفض التخصيب.