



Received: 2026/07/21
Revised: 2026/08/02
Accepted: 2026/09/05
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

TaeSeung Jeon

Hoetbul Restel, 196 Yongchu-ro, Gapyeong,
Gyeonggi-do, Republic of Korea
E-mail: king102495@naver.com

Abstract

본 연구에서는 헬리컬 크루시폼 연료 기반 소형모듈원자로(SMR)의 기술적 특성과 함정 추진 적용 가능성을 평가하였다. 헬리컬 크루시폼 연료는 열전달 성능과 냉각재 혼합을 향상시켜 소형·고출력밀도 원자로 설계를 가능하게 하며, 통합전력체계와의 연계에 적합한 특성을 제공한다. 그러나 압력강하 증가, 제조 공정의 복잡성, 규제 제약과 같은 과제가 여전히 존재한다. 따라서 함정 추진 분야에서의 실질적인 적용을 위해서는 추가적인 실험적 검증과 지속적인 기술 개발이 필요하다.

The aim of this study was to evaluate the technical characteristics and applicability of helical cruciform fuel-based small modular reactors for naval propulsion. Helical cruciform fuel improves heat transfer and coolant mixing, enabling compact, high-power-density reactor designs suitable for integrated power systems. Despite these advantages, challenges including pressure drop, manufacturing complexity, and regulatory constraints remain. Further experimental validation and technological development are required for practical naval applications.

Keywords

헬리컬 크루시폼 연료(Helical Cruciform Fuel),
소형원자로(Small Modular Reactor),
함정 추진체계(Naval Propulsion System),
통합전력체계(Integrated Power System),
열수력 성능(Thermal Hydraulic Performance)

헬리컬 크루시폼 연료 기반 소형원자로의 함정 추진 적용성과 발전방안 연구

Application and Development Strategies of Helical Cruciform Fuel-Based Small Modular Reactors for Naval Propulsion

전태승*

육군 대위/대한민국 육군 제66보병사단 화생방대대 정작과장

TaeSeung Jeon*

CPT, ROK Army/CBRN Battalion, 66th Infantry Division, Republic of Korea Army

1. 서론

최근 해군 함정은 첨단 전자장비와 무인체계의 도입으로 전력 수요가 증가하고 있으며, 장기 작전 능력의 중요성도 확대되고 있다[1,2]. 그러나 기존 디젤엔진 및 가스터빈 기반 추진체계는 연료 보급 의존성과 운용 지속성 측면에서 한계를 가진다[3]. 이에 따라 높은 에너지 밀도와 장주기 운용이 가능한 원자력 추진체계가 대안으로 주목받고 있으나, 기존 원자로는 출력밀도와 소형화에 제약이 있다[4,5]. 최근 헬리컬 크루시폼 연료(HCF)는 향상된 열수력 성능을 바탕으로 고출력·소형 원자로 구현 가능성을 제시하고 있다[6,7]. 본 연구에서는 HCF 기반 소형원자로의 기술적 특성과 함정 추진 적용 가능성을 분석하고, 향후 발전방향을 제시하였다.

2. 헬리컬 크루시폼 연료의 기술적 특성

헬리컬 크루시폼 연료는 4-lobe 단면과 축 방향 비틀림을 적용한 비원형 연료로, 넓은 열전달 면적과 횡방향 냉각재 혼합을 유도한다(Fig. 1)[8,9]. 또한 연료봉 간 간격을 자체적으로 유지하는 self-spacing 구조를 통해 스페이서 그리드를 생략하고 유로를 단순화할 수 있다[10].

헬리컬 크루시폼 연료는 self-spacing 구조를 통해 스페이서 그리드 없이 연료봉 간격을 유지하여 집합체를 단순화하고 유로의



Fig. 1. Geometry and structural configuration of helical cruciform fuel, showing the four-lobed cross-section and helical twisting structure

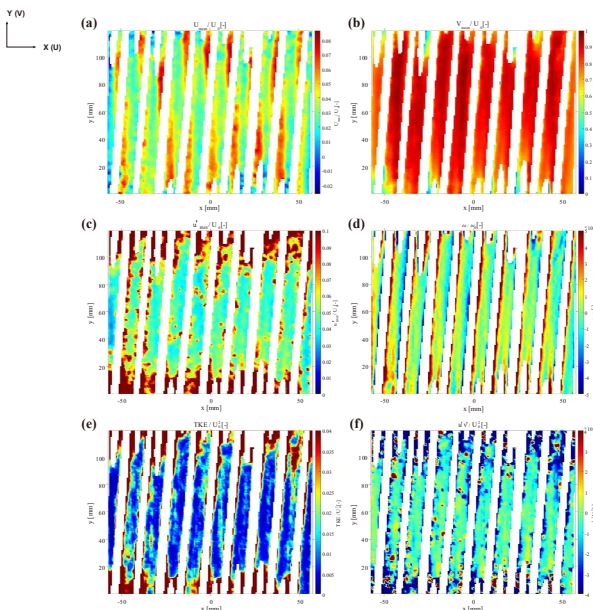


Fig. 2. Representative PIV contour maps of flow statistics (Turbulent regime). (a) Lateral mean velocity, (b) Vertical mean velocity, (c) Root-mean-square fluctuation of the lateral velocity, (d) Spanwise vorticity, (e) Turbulent kinetic energy, and (f) Reynolds shear stress

균일성을 높인다[10]. 증가된 표면적과 횡방향 유동 혼합은 열전달을 촉진하고 국부 과열과 최고 연료 온도를 낮춰 고출력 운전의 열적 여유도 향상에 기여할 수 있다. Fig. 2는 헬리컬 형상에서 나타나는 횡방향 유동과 난류 특성을 보여주며, Fig. 3는 와이어 랩 연료와 헬리컬 크루시폼 연료의 횡방향 유속을 비교하여 보여준다[11-14].

Table 1은 헬리컬 크루시폼 연료가 원통형 연료보다 높은 열전달 성능과 출력밀도, 향상된 열적 안전성을 확보할 가능성을 보여준다[7,12].

다만 복잡한 형상은 압력강하와 펌프 동력을 증가시키고 높은 제조 정밀도를 요구하므로, 효율 및 제작

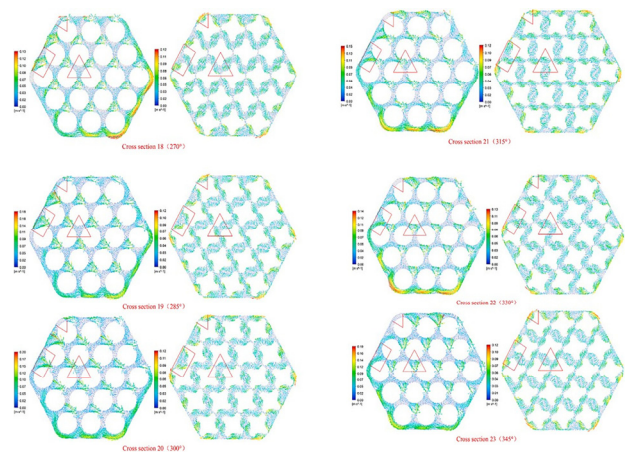


Fig. 3. Geometry and structural configuration of helical cruciform fuel, showing the four-lobed cross-section and helical twisting structure

Table 1. Performance comparison of UO_2 , MOX, and HCF

Item	Cylindrical UO_2	MOX	HCF
Fuel	UO_2	Pu-UO_2	U-50Zr
Peak temp. (°C)	1,231	–	357(–71%)
Cladding Stress (MPa)	91	–	409(×4.5)
Heat Transfer Area (cm^2)	596.75	–	802.20(+34%)
Flow Area (cm^2)	0.8779	–	1.2050(+37%)
CHF (kW/m^2)	963	–	854(–11%)
MDNBR	1.34	–	1.60(+19%)
Power uprate	+32%	–	+60%(×1.9)
Initial Pu(g)	–	89	200(×2.25)
Final Pu(g)	–	59	34(–42%)
Plutonium Reduction (%)	–	34	83(×2.4)
Burnup (MWd/tHM)	44,000	–	190,900(×4.34)
Transverse velocity	–	–	×40
Fuel Swelling	Low	–	+10 vol. %

Note. HCF = helical cruciform fuel; Pu = plutonium. Parenthetical values are relative to cylindrical UO_2 fuel, except Pu-related values, which are relative to MOX fuel.

측면의 기술적 과제를 수반한다[15].

3. 함정 추진체계 적용개념

3.1 선박 추진체계 구성

함정 추진체계는 기계식 방식에서 추진과 함내 장비에 전력을 통합 분배하는 통합전력체계(IPS)로 전

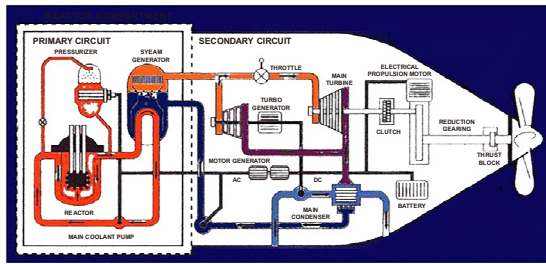


Fig. 4. Conceptual diagram of a nuclear-powered naval propulsion system based on a pressurized water reactor (PWR), illustrating the primary and secondary circuits and electric propulsion system

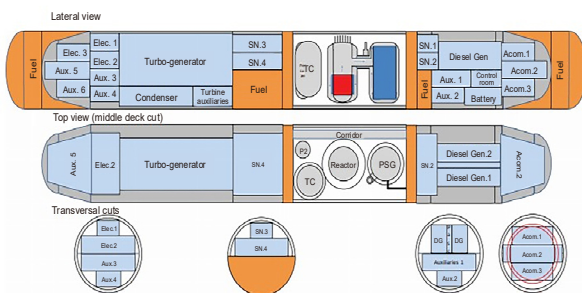


Fig. 5. General arrangement of a nuclear-powered vessel, showing the spatial distribution of reactor, turbo-generator, diesel generators, and auxiliary systems

환되고 있다[16,17]. Fig. 4는 원자로의 열에너지가 터빈과 발전기를 거쳐 추진모터 및 전자장비에 공급되는 구조를 보여주며, 소형원자로와 IPS의 결합은 에너지 효율과 운용 유연성을 높일 수 있다[1,18].

3.2 적용 가능한 원자로 유형

함정 추진용으로는 제한된 공간에 설치할 수 있는 소형원자로와 마이크로원자로가 대표적으로 고려된다. 소형원자로는 모듈화에 따른 제작·운용 효율을, 마이크로원자로는 높은 이동성과 배치 유연성을 가진다. 헬리컬 크루시폼 연료는 향상된 열전달과 유동 혼합을 통해 높은 출력밀도를 확보함으로써 고출력·소형 함정용 원자로 구현에 기여할 수 있다[19].

3.3 함정 적용 요구조건

함정용 원자로는 제한된 공간과 장기 작전을 고려하여 소형화와 장주기 무교제 운전이 요구된다. Fig. 5는 이러한 특성이 보급 의존도를 낮추고 작전 지속성을 향상시키는 관계를 보여준다[2].

함정용 원자로는 파랑과 동요뿐 아니라 충격·화재·침수 조건에서도 안전성을 유지해야 한다. 헬리컬 크루시폼 연료 기반 소형원자로의 유망한 대안이지만, 실제 적용을 위해서는 해상 및 극한 환경에서의 추가 검증이 필요하다.

4. 적용 타당성 분석

4.1 열수력 성능 관점

헬리컬 크루시폼 연료의 다엽 및 비틀림 구조는 횡방향 유동 혼합과 열전달을 촉진하여 국부 과열을 억제한다. Fig. 6는 이러한 열수력 성능이 급격한 출력 변화에서도 냉각 안정성과 열적 여유도 확보에 기여할 수 있음을 보여준다[12,20]. 또한 CHF 향상 가능성은 고출력 운전을 지원하므로 함정 추진용 소형원자로에 유리하다.

4.2 소형화 및 출력밀도

헬리컬 크루시폼 연료의 향상된 열전달 성능은 동일 출력을 유지하면서 노심을 소형화하여 무장과 센서 등의 탑재 공간을 확보하는 데 기여할 수 있다. 또한 높은 출력밀도는 추진체계뿐 아니라 레이더, 전자전 장비 및 레이저 무기를 운용하는 통합전력체계의 전력 수요를 충족하므로 미래 함정에 적합하다.

4.3 안전성

함정용 원자로는 충격·진동·경사 및 전투 손상 조건에서도 높은 안전성이 요구된다. Fig. 7은 헬리컬 크루시폼 연료의 향상된 열전달이 온도와 열응력을

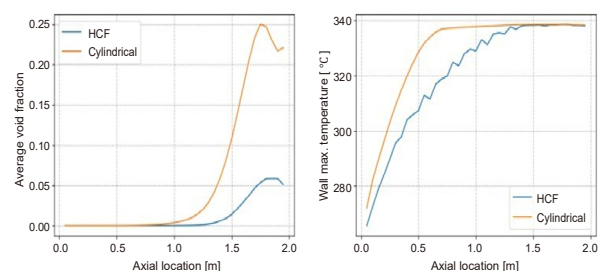
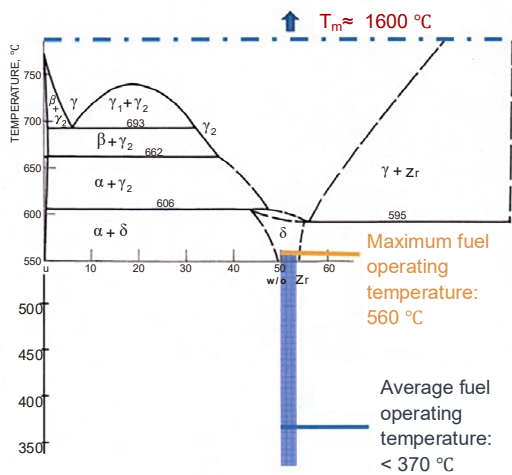


Fig. 6. Comparison of average void fraction and wall maximum temperature along the axial direction between cylindrical fuel and helical cruciform fuel



Uranium-Zirconium phase diagram. "Constitution of the Uranium-rich U-Nb and U-Nb-Zr systems", Dwight & Mueller, ANL-5581 (modified).

Fig. 7. Uranium-Zirconium phase diagram indicating the maximum and average operating temperature ranges and thermal stability characteristics of metallic fuel

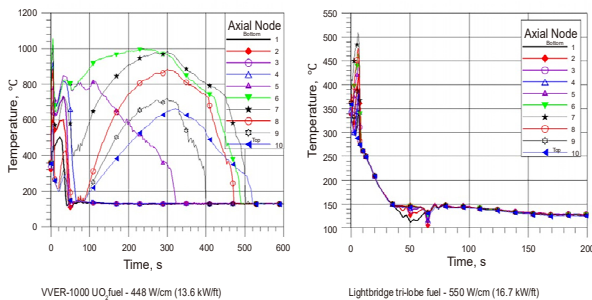


Fig. 8. Peak cladding temperature during LOCA for standard VVER-1000 fuel (left) and Lightbridge three-lobe metallic helical fuel (right). Axes differ for clarity

낮춰 연료 손상을 억제하고 장기 구조 건전성을 높일 수 있음을 보여준다[6].

금속 기반 헬리컬 크루시폼 연료는 높은 열전도도로 사고 시 열 제거 능력을 높이고 연료 온도 상승을 억제할 수 있다[18]. Fig. 8은 이러한 특성이 LOCA와 전후 손상·침수 상황에서의 사고 대응성 향상에 기여함을 보여준다[8].

4.4 운용성

헬리컬 크루시폼 연료 기반 소형원자로의 장주기 운전은 연료 보급과 정비 부담을 줄여 작전 지속성과 운용 효율을 향상시킬 수 있다. Fig. 9은 이러한 특성이 원해 및 장기 임무에서 전략적 이점을 제공할 수 있음을 보여준다[6].

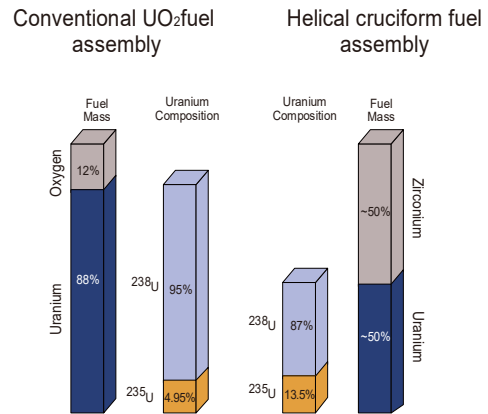


Fig. 9. Comparison of fuel composition and enrichment between conventional UO₂ fuel and helical cruciform fuel

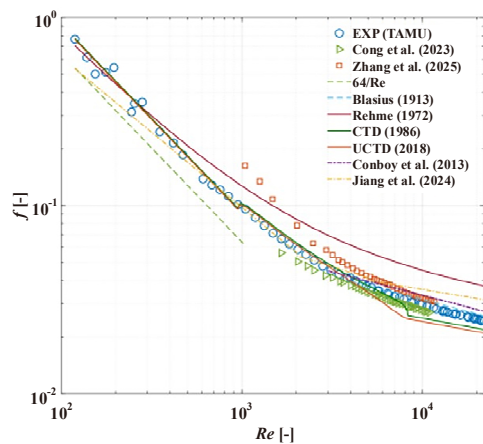


Fig. 10. Comparison of friction factor as a function of Reynolds number for helical cruciform fuel with experimental data and existing correlations

통합전력체계와 결합된 헬리컬 크루시폼 연료 기반 원자로는 추진과 함내 전력 분배를 최적화하여 무인체계 및 고출력 장비 운용의 유연성과 작전 지속성을 높일 수 있다.

4.5 제한사항

헬리컬 크루시폼 연료의 복잡한 형상은 압력강하와 펌프 동력, 제조 난이도를 증가시킬 수 있다. Fig. 9과 Fig. 10은 압력강하가 함정의 에너지 효율과 소음에 미치는 영향을 보여주며, 실제 적용을 위해서는 유로 최적화와 고정밀 제조·품질 관리가 요구된다[21,22].

금속연료의 팽창은 장주기 운전 중 열전달과 구조적 안정성을 저해할 수 있어 추가 검증이 필요하다.

또한 고순도 저농축 우라늄(HALEU)의 공급 및 규제 제약은 연료 설계와 출력 확보에 영향을 미친다[23]. 따라서 합정 적용을 위해서는 재료·기술·정책을 포괄하는 단계적 연구와 실증이 요구된다.

5. 발전방안

5.1 단·중기 발전방안

헬리컬 크루시폼 연료 기반 소형원자로의 합정 적용을 위해서는 경사·진동·출력 변동 조건에서 열수력 성능과 금속연료의 장기 건전성을 검증해야 한다. 또한 CFD·노심 다물리 해석을 바탕으로 냉각·차폐·안전계통을 통합하고, 공간·중량·생존성을 고려한 배치와 통합전력체계 연계 설계를 통해 합정용 개념 모델을 도출할 필요가 있다.

5.2 장기 발전방안

장기적으로는 헬리컬 크루시폼 연료와 열수력·재료 기술을 발전시켜 안전성과 신뢰성을 갖춘 고출력 해군 원자로를 확보해야 한다. 이를 완전 핵추진 체계로 확대하면 원해·극지 작전의 지속성과 에너지 자립성을 높일 수 있다. 한국형 핵추진 합정 개발을 위해서는 전문인력·정비체계, 연료 제조와 공급망, 합정용 규제 및 HALEU·비확산 정책을 연계한 통합전략이 필요하다.

6. 결론

본 연구에서는 헬리컬 크루시폼 연료 기반 소형원자로의 기술적 특성과 합정 추진 적용 가능성을 분석하였다. 향상된 열전달과 유동 혼합은 소형 노심에서 높은 출력밀도를 확보하는 데 기여하며, 통합전력체계와 결합할 경우 추진 및 함내 전력 운용의 효율성을 높일 수 있다. 또한 장주기 운전은 연료 보급 의존도를 줄여 원해·극지 작전의 지속성을 향상시킬 수 있다.

다만 복잡한 형상에 따른 압력강하와 제조 난이도, 금속연료의 팽창 및 구조적 건전성 문제를 해결해야 한다. 합정용 원자로의 규제기준과 HALEU 공급·비확산 정책에 대한 대응도 필요하다. 따라서 실제 적용을 위해서는 열수력·재료·구조·체계설계 분야의 실증

연구와 산업·정책 기반을 연계한 단계적 기술 개발이 요구된다.

참고문헌

- [1] S. E. Hirdaris, Y. F. Cheng, P. Shallcross, J. Bonafoux, D. Carlson, B. Prince, & G. A. Sarris, 'Considerations on the Potential Use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) Technology for Merchant Marine Propulsion,' *Ocean Engineering*, VOL. 79, 2014, pp. 101–130.
- [2] Luciano Ondir Freire & Delvonei Alves Andrade, 'Economically Feasible Mobile Nuclear Power Plant for Merchant Ships and Remote Clients,' *Nuclear Technology*, VOL. 205, NO. 6, 2019, pp. 766–780.
- [3] Julio A. Vergara & Chris B. McKesson, 'Marine Technology Nuclear Propulsion in High-Performance Cargo Vessels,' VOL. 39, NO. 1, 2002, pp. 1–11.
- [4] M. Drosinska-Komor, J. Gluch, N. Ziolkowska, L. Brenkacz, K. Brzezinska-Golebiewska, J. Blaut and P. Ziolkowski, 'Integrating Fourth-Generation Reactors into Maritime Transport,' VOL. 342, 2025, Article 122891.
- [5] Marta Drosińska-Komor, Jerzy Gluch, Łukasz Breńkacz, & Paweł Ziółkowski, 'On the Use Selected 4th Generation Nuclear Reactors in Marine Power Plants,' *Polish Maritime Research*, VOL. 29, NO. 1, 2022, pp. 76–84.
- [6] N. Hottle, J. Baggett, J. Tucker, A. Totemeier, & J. Malone, 'Lightbridge Fuel™ Development Program,' Lightbridge / Enfission / Framatome, 2018.
- [7] B. Goddard & A. Totemeier, 'Improved Disposition of Surplus Weapons-Grade Plutonium Using a Metallic Pu-Zr Fuel Design,' VOL. 209, NO. 5, 2023, pp. 696–706.
- [8] S. Holcombe, A. Mushakov, & J. Fornof, 'Development of Lightbridge's Advanced Metallic Fuel for Water-Cooled Reactors,' 2024.
- [9] Yue Zeng, Huandong Chen, & Pingjian Ming, 'Numerical Investigation on Transverse Flow of Helical Cruciform Fuel Rod Assembly in a Lead-Bismuth Cooled Fast Reactor,' *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*, VOL. 5, NO. 1, 2023, pp. 17–29.
- [10] Z. S. Li, C. Hu, B. H. Yan, & L. S. Wang, 'CFD Simulation of Internal Center Flow Blockage in Helical-Cruciform Fuel Assembly,' VOL. 186, 2025, Article 105831.
- [11] T. Jeon, 'Flow Characteristics in a 9×9 Helical Cruciform Fuel Rod Bundle Using Particle Image Velocimetry Measurements,' College Station, TX, USA, 2026.
- [12] Youyeon Choi & Koroush Shirvan, 'Safety and Thermo-Mechanical Performance of Metallic Helical Cruciform Fuel in Light-Water Cooled SMRs,' *Conference Paper*, MIT, Cambridge, MA, 2024.
- [13] Scott Holcombe, Andrey Mushakov, & James Fornof, 'An Advanced Fuel for LWR and SMR Designs,' 2023.

- [14] Y. Zeng H. Chen, & P. Ming, 'Numerical Investigation on Transverse Flow of Helical Cruciform Fuel Rod Assembly in a Lead-Bismuth Cooled Fast Reactor,' *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*, VOL. 5, NO. 1, 2023, pp. 17–29.
- [15] Qi Zhang, Haoyu Wang, Junlong Li, Quanyao Ren, Yile Zhang, Yi Zhou, Zengping Pu, Yongzhong Huang, & Hanyang Gu, 'Experimental Study on Flow Resistance and Phase Distribution of Gas-Liquid Flow in Helical Cruciform Fuel Assembly,' *Annals of Nuclear Energy*, VOL. 210, 2025, Article 110838.
- [16] Cody Lloyd & Braden Goddard, 'Proliferation Resistant Plutonium: An Updated Analysis,' *Nuclear Engineering and Design*, VOL. 330, 2018, pp. 297–302.
- [17] Cody Lloyd, Ravi Hadimani, & Braden Goddard, 'Time Dependent Heat Transfer of Proliferation Resistant Plutonium,' *Nuclear Engineering and Technology*, VOL. 51, NO. 2, 2019, pp. 510–517.
- [18] J. Malone, N. Shapiro, S. Vaidyanathan, & A. Totemeier, 'Introduction to Safety Attributes of the Lightbridge Metal Fuel Technology,' Lightbridge Corporation, McLean, VA, 2011.
- [19] Kyle M. Paaren, Eric Shaber, & Scott Holcombe, 'Lightbridge Fuel Fabrication Modeling in ABAQUS with Experimental Comparisons,' in *TopFuel 2025: Nuclear Reactor Fuel Performance Conference*, Nashville, TN, 2025, pp. 662–671.
- [20] Zach Huber & Elise Conte, 'Casting and Characterization of U-50Zr,' Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 2023.
- [21] Hansol Kim, Matthew Kinsky, Dalton Pyle, Joseph Seo, & Yassin A. Hassan, 'Experimental Investigation of Flow Regimes and Friction Factor in a 9×9 Helical Cruciform Fuel Rod Bundle,' in *proceedings of 21st International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, Busan, 2025.
- [22] Birol Aktas, 'Conceptual Assessment of Lightbridge Fuel™ Post-CHF Performance,' in *TopFuel 2025*, Nashville, TN, 2025, pp. 1035–1049.
- [23] U.S. Nuclear Regulatory Commission, High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU), <https://www.nrc.gov/materials/new-fuels/haleu> (accessed 2026.07.20.)