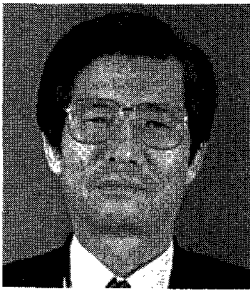


중수로용 개량 핵연료 개발경위와 향후전망

석 호 천

한국원자력연구소 중수로핵연료개발팀 팀장



월성 원자력발전소와 같은 중수로에 쓰이는 개량 핵연료(CANFLEX)가 새로이 개발돼, 중수로형 원자력발전소의 안전성은 물론 경제성을 크게 향상시키게 되었다. 한국원자력연구소와 캐나다원자력공사는 최근 천연 우라늄을 사용하는 개량 핵연료(CANFLEX-NU)와 순환 우라늄을 사용하는 고연소도 핵연료(CANFLEX-RU)의 공동 개발에 대한 협정을 체결하였다. 이를 통해 우리 나라는 중국·아르헨티나·터키 등 중수로 발전소 건설을 추진중인 제3국 핵연료 시장에 단독 진출할 수 있는 교두보를 마련하였다. 개량 핵연료를 노후되는 기존 중수로 원전에 사용할 경우 향후 10년간 약 400억원의 비용절감효과가 예상된다.

한국원자력연구소 중수로핵연료개발팀(팀장 석호천 박사)이 캐나다원자력공사와 공동 개발한 중수로용 개량 핵연료의 개발 경위 등을 알아본다.

우 리 나라에서 현재 가동중에 있는 원자력발전소는 모두 11기인데, 이들 중 10기는 경수로형 발전소이고 나머지 1기는 중수로형 발전소이다.

비록 현재 가동중인 원전의 숫자만 비교할 때는 경수로 원전이 월등히 많지만, 현재 건설중에 있는 원전까지 포함하면 중수로 원전도 모두 4기(월성 1·2·3·4호기)가 되어 결코 적지 않은 숫자가 된다.

따라서 우리 나라에서는 한국 표준형 원전으로 대표되는 경수로를 원전의 주종노형으로 중수로를 보완 노형으로 고려하고 있다.

즉 우리 나라에서는 중수로와 경수로의 특징을 서로 보완적으로 연계하여, 한정된 우라늄 자원을 효율적으로 이용하는 등의 자립적 국가 에너지 보장 정책 완성을 추구하고, 한편으로 보다 경제적인 원자력 발전이 가능하도록 추구하고 있다.

중수로용 개량 핵연료의 개발은 이상의 취지에서 착수되었다.

개발 경위

한국원자력연구소에서는 81년부터 86년까지 37개 핵연료봉 다발인 월성 1호기용 핵연료를 국산화하였고, 87년부터 월성 1호기에 전량 장전하고 있다.

월성 1호기용 핵연료는 모든 중수

로 원전에서 현재 사용하고 있는 표준 핵연료인데, 천연 우라늄으로 제조된 지름 1cm의 원통형 소결체를 핵연료봉에 넣은 후, 37개 핵연료봉들을 하나의 다발로 조립한 것이다.

캐나다에 있는 중수로 원전과 우리나라 월성 1호기의 운전 경험을 비추어 볼 때, 현재 사용하고 있는 표준 핵연료는 원전의 안전성과 경제성 면에서 결코 문제가 있는 것이 아니며, 오히려 놀랄 만큼 좋은 성능을 발휘하고 있는 것으로 인정받고 있다.

그러나 국내에서 원자력 발전의 비율이 점차 높아짐에 따라 원전의 안전성에 대한 국민들의 신뢰도 확보가 문제시되고 있고, 또한 방사성 폐기물 처분에 어려움을 겪고 있다.

이러한 상황에서 사용후 핵연료 발생량을 대폭 줄일 수 있는 방안이 강구되고 있으며, 개량 핵연료 개발의 필요성이 또한 계속 강조되어 왔다.

이를 해결하기 위하여 한국원자력 연구소에서는 87년부터 중수로용 개량 핵연료 개발에 착수하였다.

국내에서 중수로용 개량 핵연료 개발을 준비중이던 80년대 중반, 캐나다 온타리오주에 있는 Bruce A 중수로 원전에서 운전 여유도가 모자라 원전 운전에 어려움을 겪는 일이 발생하였다.

이때를 맞추어 캐나다원자력공사(AECL)에서는 다음과 같은 명제하에, 86년부터 중수로형 원자력발전소 소유자 그룹(COG CANDU Owner

Group)의 지원을 받아 1.2%의 저농축 우라늄을 사용하는 중수로용 개량 핵연료(CANFLEX)를 개발하여 왔다.

① 원자력 발전 사업자, 핵연료 가공 사업자, 캐나다원자력공사 사이의 상호 협력

② 경수로 등 타종 원전에 대한 중수로 원전의 경쟁력 강화

③ 캐나다에서 우라늄을 농축할 수 있는 기회 포착

④ 기존 및 신규 원전 등에 적용할 수 있는 핵연료의 설계 개선, 즉 열수력 설계 최적화와 원전의 안전성, 운전 기동성 및 운전 여유도 제고, 그리고 원전의 출력 증강

⑤ 천연 우라늄, 순환 우라늄 혹은 저농축 우라늄 등의 기존 및 개량 핵연료 주기 활용성 강화와 핵연료 연소도 확장 및 사용후 핵연료 발생량 감소 등을 위한 신기술 개발

캐나다원자력공사는 90년 전후에 개최된 국제 원자력 학술 회의에서, 1.2% 저농축 우라늄 핵연료를 중수로에 사용할 때 최고의 경제성을 확보할 수 있다고 보고한 바 있다.

한국원자력연구소와 캐나다원자력공사는 동일한 목적을 갖는 개량 핵연료를 86년부터 독자적으로 각각 개발하여 오다가, 88년에 개최된 한·캐 원자력공동조정위원회에서 중수로용 개량 핵연료의 공동 개발 협력을 합의하였다.

양 기관은 본 원자력공동조정위원

회 합의 사항의 후속 조치로, 89년부터 1년에 걸쳐 CANFLEX 핵연료의 타당성 연구를 공동 수행하였고, 이를 통해 CANFLEX 핵연료가 중수로의 안전성과 경제성을 제고할 수 있으며 기술적으로 개발이 가능하다는 결론을 얻었다.

이러한 타당성 공동 연구 결과에 따라, 한국원자력연구소는 개발 제품의 신뢰성과 결과를 한층 더 강화하고 연구 개발비를 절감할 수 있다는 판단하에, 91년부터 캐나다원자력공사와 공동으로 원전 안전성과 운전 여유도를 향상시킬 수 있고 천연 우라늄을 포함하여 순환 우라늄, 저농축 우라늄 등의 개량 핵연료 주기를 수용할 수 있는 CANFLEX 핵연료 다발을 개발하기에 이르렀다.

한국원자력연구소와 캐나다원자력공사는 92년 중반까지 CANFLEX 1.2% 저농축 우라늄 핵연료의 개발, 검증, 상용화 시범 조사, 실용화 등의 일련의 계획으로 공동 연구 개발을 추진하여 왔다.

그러나 92년 하반기 캐나다원자력공사는 저농축 우라늄 핵연료 개발에 대한 캐나다 내 천연 우라늄 생산업자 등의 강한 반발을 감지하였고, 한국원자력연구소는 개량 핵연료 개발을 천연 우라늄을 사용하는 핵연료 개발부터 단계적으로 추진하라고 권고한 원자력 중장기 연구 개발 사업 평가 위원회의 의견을 수용하여야 할 처지에 놓였다.

양 기관은 향후 상용 중수로 원전에서 CANFLEX 핵연료 다발의 시범 조사 실증을 수행할 경우 부딪힐 원자력 발전 회사의 보수적 입장을 또한 고려하여야 하기 때문에, 천연 우라늄을 사용하는 개량 핵연료를 먼저 개발하는 것이 바람직하다는 결론을 내렸다.

따라서 93년초부터 양 기관은 제1단계 공동 연구 개발 과제로 천연 우라늄 개량 핵연료(CANFLEX-NU)를 개발하고 있는데, 이를 위하여 연구로 내외 검증 시험, 상용로 시범 조사, 실용화 등의 일련의 추진 과정에서 1.2% 저농축 우라늄 사용의 경우까지 가능한한 고려하고 있다.

CANFLEX의 특징

캐나다원자력공사와 공동으로 개발하고 있는 중수로용 개량 핵연료는 43개 핵연료봉으로 구성된 다발이다.

현재 사용중이며 표준 핵연료인 37개 핵연료봉 다발에서는 핵연료의 안전성 때문에 천연 우라늄만을 사용할 수밖에 없지만, 개량 핵연료인 CANFLEX에서는 천연 우라늄뿐만 아니라 저농축 우라늄, 순환 우라늄 등 다양한 핵연료 자원을 융통성 있게 사용할 수 있다.

이와 같은 의미에서 중수로용 개량 핵연료의 영어 이름으로, 융통성 있는 중수로 핵연료 주기라는 CANDU

flexible fuelling을 축약한 말인 CANFLEX를 사용한다.

〈그림〉에 나타난 바와 같이 중수로용 개량 핵연료 다발 CANFLEX는 중심에 1개 핵연료봉, 내환에 7개 핵연료봉, 중환에 14개 핵연료봉, 외환에 21개 핵연료봉이 배치되어, 모두 43개의 핵연료봉으로 구성된다.

이들 중 바깥쪽 두 개의 환(외환 및 중환)에 있는 35개 핵연료봉은 표준 핵연료봉보다 직경이 약간 작게 설계되어 있다.

이는 외환봉에 나타나는 출력을 표준 핵연료 다발보다 20% 정도 저하시켜 핵연료의 최대 허용 온도를 감소시키고, 결과적으로 핵연료의 핵분열 생성물 기체 방출량을 대폭 감소시키기 위한 것이다.

안쪽 두 개의 환(내환 및 중심)에

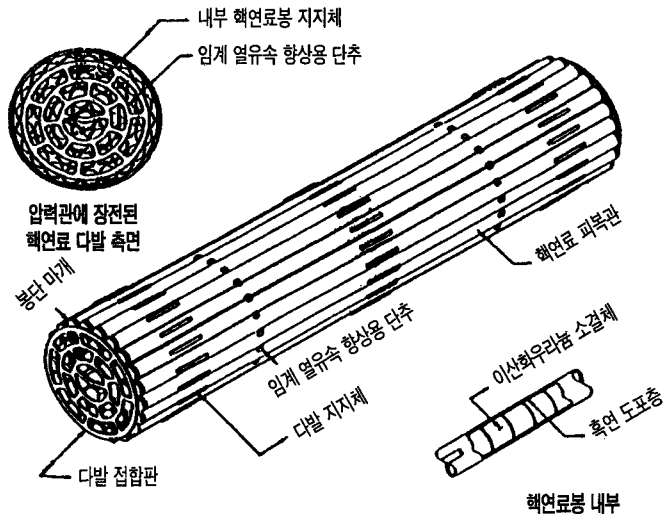
서는 표준 핵연료봉보다 직경이 약간 큰 핵연료봉을 사용한다.

이는 바깥쪽에 직경이 작은 핵연료봉을 사용함에 따라 작아지는 우라늄량을 표준 핵연료 다발의 우라늄량과 같은 수준으로 보상 유지하고, 핵연료 다발 반경 방향 출력 분포를 균일하게 하기 위해서이다.

외환 핵연료봉의 소결체 내 핵분열 생성물 기체 방출량이 대폭 감소됨에 따라 원자로에서 개량 핵연료를 표준 핵연료보다 3배까지 더 길게 연소시킬 수 있으며, 이 결과로 사용후 핵연료 발생량이 표준 핵연료의 1/3 수준까지 낮아질 수 있다.

개량 핵연료의 또다른 특징은 버튼이라는 부착물이다.

핵연료봉 위에 부착되는 버튼은 냉각수 흐름과 부딪혀 난류를 유발하



〈그림〉 중수로용 개량 핵연료(CANFLEX) 구조

며, 이를 통해 핵연료봉과 냉각수 사이의 열전달을 증가시킨다.

핵연료봉과 냉각수 사이에 열전달이 좋아지면, 핵연료봉에 기포가 발생될 수 있는 출력, 즉 dryout power가 버튼을 핵연료봉에 부착하기 이전보다 더 높아진다.

중수로에서 출력이 높으면 채널 내 핵연료가 손상될 수 있는데, 이때 핵연료 손상이 발생되기 시작하는 채널 출력을 임계 채널 출력이라고 부른다.

따라서 핵연료 보호와 원자로 안전성 확보를 위해 임계 채널 출력보다 조금 낮은 출력을 한 기준으로 정하고, 원자로 운전시 출력이 이 기준을 넘지 못하도록 규정하고 있다.

이 기준을 국부 과출력 보호 기준(ROP trip setpoint)이라고 하며, 100% 원자로 출력에 대한 그 비율로 원자로의 운전 여유도를 나타낸다.

개량 핵연료 다발에서 버튼 사용에 따라 dryout power가 높아지고, 이 결과로 임계 채널 출력이 5% 이상 증대된다.

앞에서 설명한 바와 같이 원자로의 국부 과출력 보호 기준이 임계 채널 출력에 비례하므로, 개량 핵연료 사용을 통해 원자로 운전 여유도가 5% 이상 증대된다.

중수로에서는 수평으로 놓여 있는 채널 내에 12개의 핵연료 다발이 장전되는데, 이 채널에 또한 고온·고압의 냉각수가 흐르므로, 원자로 연

령이 커질수록 높은 출력을 발생하는 채널에서 크립이 발생될 수 있다.

또한 원자로 고령화에 따라 증기 발생기 세관에 이물질(crud) 누적이 가속화될 수 있다.

이 두 현상에 의해 원자로 입구 모관에서의 냉각수 온도가 상승하게 되며, 결과적으로 원자로 운전 여유도를 저하시키는 현상이 초래될 수 있다.

이러한 경우 원자로 운전 여유도를 증대시키는 개량 핵연료 다발을 사용하면, 원자로 운전 여유도 저하에 따라 오는 원전 출력 감소 운전에 대한 막대한 경제적 손실을 보상할 수 있다.

앞으로의 전망

한국원자력연구소와 캐나다원자력공사와의 CANFLEX 핵연료 공동 연구 개발 과정과 또한 캐나다원자력공사와 캐나다 내 중수 원전 발전 사업자와의 논의 과정에서 나타난 바와 같이, CANFLEX 천연 우라늄 핵연료를 발전 운전이 14년이 지나 노후화되어 가는 중수로 원전에 사용할 경우, 향후 10년 동안 약 400억원의 경제적 이득을 예상하고 있다.

또한 노후화 원전의 5% 출력 감소 방지 또는 기존 혹은 신규 원전의 5% 출력 증가로 운전을 할 경우, 월성로와 같은 중수로 원전 1기당 약 80억원의 경제적 이득을 예상하고

있다.

따라서 노후되는 기존 중수로 원전과 신규 중수로 원전에서 개량 핵연료를 사용할 경우, 증대되는 운전 여유도 만큼 원자로 출력을 상승시킬 수 있기 때문에 원전의 발전 단가를 크게 저하시킬 수 있다.

한국원자력연구소와 캐나다원자력공사는 현재 한국원자력연구소의 핵연료 가공 자격화와 열유동 검증 시험, 캐나다원자력공사에서의 임계 열유속 시험, 노물리 특성 시험 및 중수로 핵연료 장전기와의 양립성 검증 시험을 거쳐 천연 우라늄을 사용하는 개량 핵연료(CANFLEX-NU)를 개발 완료하였다.

특히 캐나다원자력공사에서는 차기년중 캐나다 상업 발전 원전에서 CANFLEX-NU의 시범 장전 수행 계획을 발전 회사와 심도있게 협의하고 있다.

상업로에서의 시범 장전을 계기로 CANFLEX 핵연료가 중수로용 표준 핵연료로 대체될 것으로 전망된다.

그리고 국내 월성 1호기도 노후화 되면 CANFLEX 핵연료가 필수적으로 사용될 것으로 전망된다.

한국원자력연구소는 CANFLEX-NU 핵연료 설계 승인을 정부에 신청하여 97년에 취득할 예정이다.

96년 9월 서명된 CANFLEX-NU 핵연료 공동 개발 재협정서에 따르면, 한국원자력연구소는 한국에서의 지적 및 상용 등의 재산권을 독

점할 뿐만 아니라, 아르헨티나·루마니아 등의 중수로 원전 보유국, 혹은 중국·터키 등과 같이 중수로 원전을 보유하고자 하는 제3국에 그 재산권을 독자 수출할 수 있게 되어 있다.

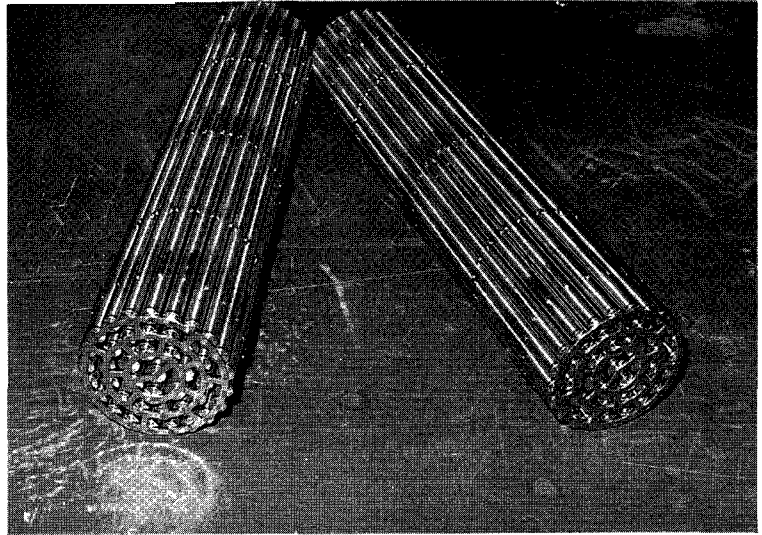
이로써 한국원자력연구소는 핵연료 제품 및 기술을 국제 시장에 수출할 수 있는 교두보를 마련하였다.

한국원자력연구소는 상업로에서의 시범 장전 후 CANFLEX 핵연료 기술을 국내 관련 산업체에 전수하려고 하고 있다.

한국원자력연구소는 CANFLEX-NU 핵연료 개발 과정에서 개선된 기술을 기존 37개 핵연료봉 다발에도 적용하였는데, 그 한 예로서 <사진>에 나타나 있는 것과 같은 중수로용 기존 및 개량 핵연료 다발 겸용 조립 용접기를 들 수 있다.

이 용접기는 자동 전산화된 용접기로 세계 최초로 개발된 기존 및 개량 핵연료 다발 겸용 조립 용접기이며, 이미 기존 핵연료 생산에도 적극 활용되고 있다.

한국원자력연구소와 캐나다원자력공사는 중수로 원전의 안전성과 운전 여유도를 증대시키는 CANFLEX 천연 우라늄 핵연료 다발의 공동 개발이 완료되는 현 시점에서, 제2단계 공동 연구 개발 과제로서 CANFLEX 핵연료 다발의 안전성과 운전 여유도 증대 등의 장점을 활용하고, 단·중기적으로 핵연료 경제성



중수로용 개량 핵연료 다발

을 제고하여 기존 및 신규 중수로 원전의 발전 단가를 절감할 수 있는 순환 우라늄 사용 개량 핵연료(CAFLEX-RU)를 선정하였으며, 이를 위해 96년 9월 공동 개발 협정을 체결하였다.

이 협정에 의하면 앞으로 개발될 CANFLEX-RU 핵연료 제품 및 기술도 CANFLEX-NU 핵연료 제품 및 기술과 같이 양 기관의 자국에서 지적 및 상용 등의 재산권을 독점하고, 제3국에 서로 간섭 없이 독자 수출할 수 있다.

한국원자력연구소와 캐나다원자력공사는 또한 본 공동 연구 개발의 효율성을 한층 더 강화하고 개발 제품과 결과의 신뢰성을 상승시키기 위하여, 영국핵연료공사(BNFL)와 각각

96년 11월 및 1월에 공동 연구 개발 협정을 서로 체결, 순환 우라늄을 사용하는 개량 핵연료(CANFLEX-RU) 개발에 본격적으로 착수하였는데, 2000년대 초기까지 개발을 완료하고 실용화할 예정이다.

본 국제 공동 연구 개발에서는 사용후 핵연료를 영국·프랑스 및 일본 등의 기존 재처리 시설에서 플루토늄(Pu) 추출을 위해 사용후 핵연료를 재처리하는 과정에서 부산물로서 얻는, 약 0.9%의 U-235 농축도를 가진 순환 우라늄(RU)을 고려하고 있다.

이러한 순환 우라늄은 영국 및 프랑스 등의 서방 국가에서만 약 20,000톤 정도 누적되어 있는데, 이 양은 월성 원전의 원자로와 같은 중

수로 원전 1기에 400년 동안 사용할 수 있는 양이다.

2000년 전후로 순환 우라늄 누적량이 25,000톤으로 더 늘어날 것으로 추산되며, 국제적 핵투명성을 갖는다.

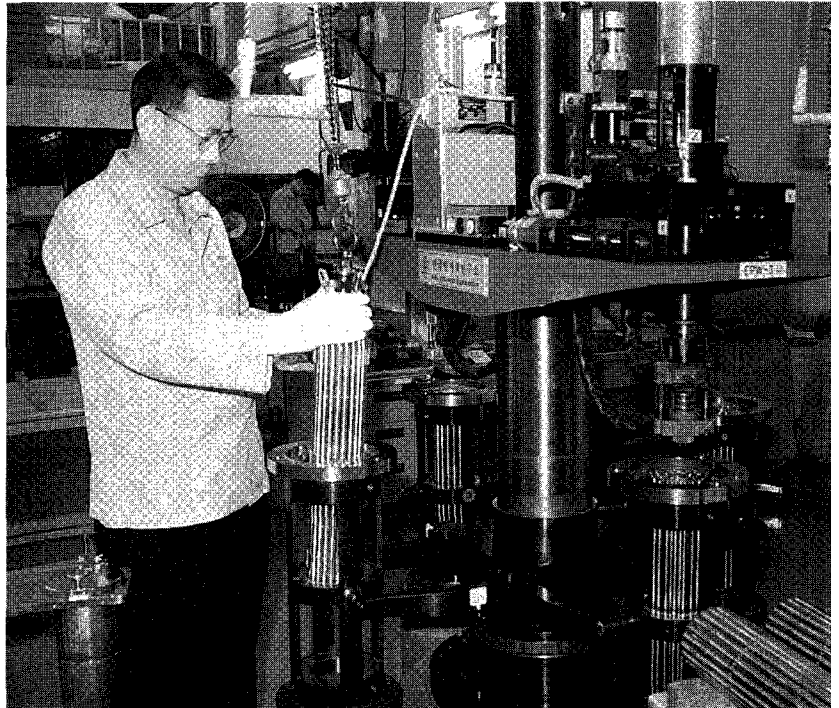
이러한 순환 우라늄 누적량에 향후 생산까지 고려하면, 전세계 중수 원전에 약 30년 동안 충분히 활용할 수 있는 순환 우라늄 자원이 확보된다.

U-238, U-236, U-235, U-232 핵종 등이 포함된 순환 우라늄을 농축하여 경수로에 사용할 경우에는, 가연성 U-235 핵종의 연소도가 1% 정도로 감소되고 현재의 농축비가 높으므로 경제성이 없는 것으로 알려져 있다.

이에 따라 순환 우라늄은 세계 우라늄 시장에 등장하지 못하고, 그 소유자가 자국의 원자력 법령과 국제원자력기구(IAEA)의 핵물질 통제 사항에 따라 저장·관리하고 있다.

그러나 순환 우라늄을 중수로에 사용할 경우, 가연성 U-235 핵종의 연소도가 약 0.2%의 작은 비율로 감소될 뿐만 아니라 농축이 필요하지 않으며, 현재 천연 우라늄 핵연료와 비교하여 연소도가 2배로 증가되고 사용후 핵연료 발생량이 2배로 감소되므로, 핵연료의 경제성이 향상되어 원전 발전 단가를 절감하는 데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

특히 세계적으로 산재되어 있는 순환 우라늄의 가격은 단순한 저장으로



한국원자력연구소가 개발한 중수로용 기존 및 개량 핵연료 다발 검용 자동 용접기로 CANFLEX 핵연료 다발을 조립·용접하고 있는 모습

인한 보관 경비를 고려하여 천연 우라늄 가격보다 훨씬 저렴할 것으로 예상된다.

이상에서와 같이 순환 우라늄을 사용하면 저렴한 원자재비뿐만 아니라 연소도 증대에 따른 경제성 증가를 통해, 중수로 1기당 연간 핵연료비를 50%~60% 정도(약 30억원) 절감할 수 있다.

따라서 중수로용 순환 우라늄 핵연료(CANFLEX-RU)는 2000년대 초기 상용 중수로에서의 시범 조사 실증이 끝나면, 중수로 원전의 최대 보

유국인 캐나다를 포함한 우리나라의 중수로 원전에 또 하나의 개량 핵연료로 실용화될 것으로 전망된다.

특히 경·중수로를 동시에 보유하고 있는 우리나라에서는 국내에서 발생된 사용후 경수로 핵연료가 해외 위탁 재처리 등을 통하여 경수로용 혼합 핵연료(MOX)로 재활용될 경우, 중수로용 순환 우라늄 핵연료(CANFLEX-RU)를 통해 우리나라의 자급형 핵연료 주기(closed fuel cycle)를 달성할 수 있을 것으로 기대된다. ☞