

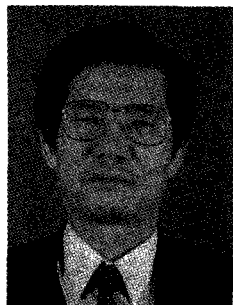


중수로용 개량 핵연료의 개발과 실용화

- 캐나다 Point Lepreau 원전 시범 장전 -

석 호 천

한국원자력연구소 중수로 개량핵연료개발 과제 책임자



한 국원자력연구소(KAERI) 「중수로용 개량 핵연료 기술 개발」과제(과제 책임자: 석호천)에서는 과학기술부의 원자력 연구 개발 중장기 사업의 일환으로, 지난 92년부터 캐나다원자력공사(AECL)와 1단계로써 천연 우라늄을 사용하는 중수로용 개량 핵연료(CANFLEX-NU)를 공동 개발하는데 성공하였다(그림 1).

KAERI는 이번에 개발된 중수로용

개량 핵연료와 관련된 4건의 국내 특허를 이미 획득하였으며, 3건은 특허 출원중에 있고, 3건의 프로그램도 등록하였다.

CANFLEX는 중수로용 개량 핵연료의 영어 이름으로, 융통성 있는 중수로 핵연료 주기라는 CANDU Flexible Fuelling을 축약한 말이다.

CANFLEX-NU 핵연료는 월성 원자력발전소와 같은 캐나다 상용 발전소인 포인트 러프러(Point Lepreau) 중수로에 98년 9월 최초 및 시범 장전됨으로써 중수 원자력발전소의 안전성은 물론 경제성을 크게 향상시키게 되었다.

KAERI 및 AECL이 공동 개발한 43개 이원봉 CANFLEX-NU 핵연료 이전의 중수로(CANDU)용 원전 연료는 50년대에 AECL이 단독 개발한 NPD 원자로용 7개 핵연료봉 다발을 시작으로, Douglas Point 19개 핵연료봉 다발, Pickering GS 'A'

28개 핵연료봉 다발, Bruce GS 'A' 37개 핵연료봉 다발 및 CANDU-6 37 핵연료봉 다발들이 있다.

이들 중 37개 핵연료봉 다발은 캐나다·한국·아르헨티나·루마니아의 상용 발전 중수 원전에서 사용되고 있으며, 28개 핵연료봉 다발은 캐나다와 인도의 소수 중수 원전에서 사용되고 있다.

중수 원전 보유국들은 기술 수준의 차이는 있으나 자체 개발한 중수로용 천연 우라늄 핵연료 가공 기술을 갖고 있다.

우리 나라에서는 KAERI가 81년부터 86년까지 성공적으로 개발한 월성 원전 37개 핵연료봉 다발을 86년부터 가공하여 월성 원전 1호기에 공급하여 왔다.

이와 같은 KAERI의 중수로 핵연료 가공 사업이 원자력 산업의 기관별 업무 조정에 따라 96년 12월에 종료함과 동시에 97년 1월부터 한전원자

력연료(주)(KNFC)로 이관되었다.

KNFC는 캐나다 General Electric 사와의 협력으로 대덕연구단지 내 연산 400톤 규모의 중수로 핵연료 가공공장을 건설하여 98년부터 상용 생산에 착수하여 월성로에 공급하고 있다.

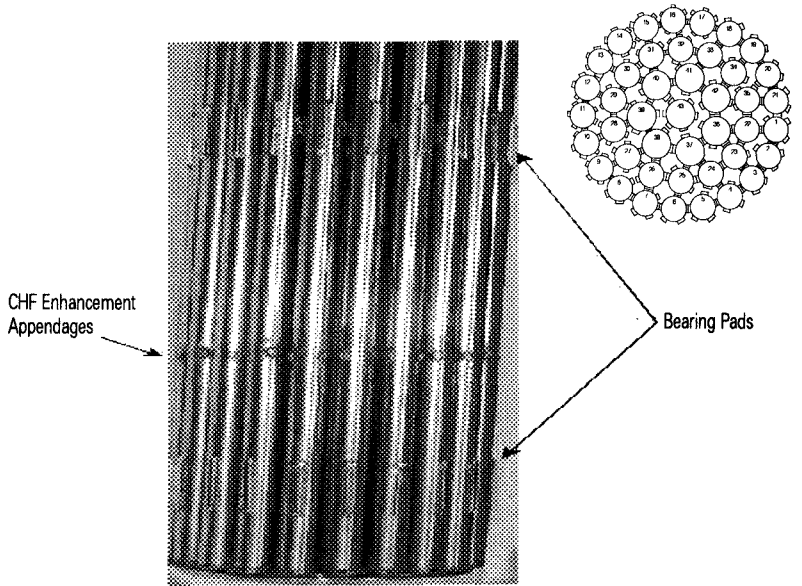
또한 KNFC는 CANFLEX-NU 핵연료의 국내 상용화에 대비하여 중수로용 개량 핵연료 가공 기술 개발을 원자력 중장기 개발 사업의 일환으로 KAERI의 국제 공동 연구 과제로서 수행하고 있다.

개발 동기 및 추진 전략

천연 우라늄을 사용하고 있는 월성 원전 1 기에는 연간 80~90톤의 사용후 핵연료가 발생한다.

이 중수 원전 사용후 핵연료는 경수로의 연간 25톤 내외의 사용후 핵연료 발생량과 비교하여 3배 이상이 되며 또한 저장의 어려움이 점차 증가됨에 따라, 사용후 핵연료를 대폭 감축시킬 수 있는 개량 핵연료 개발의 필요성이 절실했다.

83년 상업 발전이 시작된 월성 1 호기와 거의 같은 시점에 건설/준공된 캐나다 포인트 러프러 중수 원전에서는 높은 출력이 발생하는 핵연료 채널에서 크립 발생 징후가 나타났으며, 또한 증기발생기 세관에서는 이물질(crud) 누적이 가속화되어 원자로 입구 모관에서의 냉각수 온도가 상승함에 따라 결과적으로 원자로 운



(그림 1) CANFLEX 43-Element Bundle

전 여유도를 저하시키는 현상이 감지되었다.

이에 따라 중수 원전의 고령화에 따른 운전 여유도 감소와 이로 인한 원전 출력 감소 운전을 극복하거나 보상할 수 있는 개량 핵연료 개발의 요구가 절실한 시점이다.

한국원자력연구소와 캐나다원자력공사의 중수로용 개량 핵연료 개발팀은 사용후 핵연료를 대폭 감축시킬 수 있고 노후 중수 원전의 운전 여유도 감소를 보상할 수 있는 중수로용 개량 핵연료 개발의 목표를, 기존 37개 천연 우라늄 핵연료봉 다발과 비교하여 '안전성 향상'과 '경제성 향상'으로 설정하였다.

중수로용 개량 핵연료 개발팀은 이러한 목표 설정에 따라, 현재 운전중

이거나 혹은 건설중인 중수 원전과 양립하고 안전 규제치를 충족하는 동시에 1차적으로 37개 핵연료봉 다발의 구조와 재원을 개량하여 핵연료 및 원자로 운전의 안전 여유도 향상을 도모할 수 있는 개량 핵연료 다발을 개발하는 전략을 수립하여 CANFLEX-NU 핵연료 다발을 개발하였다.

또한 중수로용 개량 핵연료 개발팀은 2차적으로 CANFLEX 핵연료 다발 설계를 기초로 하여 저농축 우라늄, 순환 우라늄 등의 개량 핵연료 주기를 도입함으로써 연간 핵연료 주기비를 절감하며, 핵연료 주기 시장 변화에 대한 적응성 뿐만 아니라 선진국 기술 보호 장벽에 대처하는 경쟁력을 강화하고 우라늄 이용률을 향상



시킬 수 있는 중수로용 고연소도 핵연료를 개발하는 전략을 수립한 결과, 현재 중수로용 순환 우라늄 핵연료 개발의 타당성을 규명하고 있다.

CANFLEX 핵연료 설계 양상

이번에 개발된 중수로용 개량 핵연료인 CANFLEX 다발은 중심에 1개 핵연료봉, 내환에 7개 핵연료봉, 중환에 14개 핵연료봉, 외환에 21개 핵연료봉이 배치되어 모두 43개인 이원봉으로 구성되어 있다(그림 1).

CANFLEX 핵연료 다발은 기존 37개 핵연료봉 다발보다 핵연료봉 수가 증가하였고, 바깥쪽 두 개 환(외환 및 중환)에 있는 35개 핵연료봉은 표준 핵연료봉보다 직경이 약간 작게 설계되었기 때문에, 동일 원자로 출력 조건에서 핵연료봉 1개가 담당하여야 하는 최대 출력을 20% 정도까지 감소시켜 방사성 물질 생성량 방출을 1/4 수준으로 낮추는 장점이 있다.

이 결과로 원자로에서 기존의 표준 핵연료보다 3배 이상의 장기간 연소가 가능하게 하였고, 사용후 핵연료 발생량 또한 표준 핵연료의 1/3 수준까지 낮아질 수 있도록 하였다.

CANFLEX 핵연료 다발의 내부 두 개 환(내환 및 중심)에서는 표준 37개 핵연료봉 다발의 봉 직경보다 약간 큰 핵연료봉을 사용한다.

이는 바깥쪽에 직경이 작은 핵연료봉을 사용함에 따라 줄어드는 우라늄

량을 표준 핵연료 다발의 우라늄량과 같은 수준으로 보상/유지하고 핵연료 다발 반경 방향 출력 분포를 균일하게 한다.

43개 이원봉으로 구성된 CANFLEX 핵연료 다발은 원자로 안전성을 크게 향상시키고 천연 우라늄뿐만 아니라 다양한 종류의 핵연료, 즉 저농축 우라늄, 순환 우라늄, 혼합 우라늄, 토륨 핵연료 등을 수용할 수 있다.

또한 CANFLEX 핵연료 다발은 순환 우라늄을 포함한 저농축 우라늄 사용시, 연소도를 증대시킬 수 있는 동시에 연간 필요한 핵연료 소요량과 연간 방출되는 사용후 핵연료 생성량도 크게 감소시켜 핵연료의 경제성이 크게 향상될 것으로 예상하고 있다.

CANLEX 핵연료 다발의 또 다른 특징은 열전달 향상용 버틴이라는 부착물이다.

핵연료봉 외면에 부착되는 버틴은 냉각수 유동 내에 교란을 유발시키며, 이를 통해 핵연료봉과 냉각수 사이의 열전달 및 임계열 유속을 증가시킨다.

임계 열유속은 핵연료봉 표면의 냉각수가 고갈되어 일어나는 현상으로, 버틴을 부착한 경우에는 버틴에 의한 유동의 교란 뿐만 아니라 핵연료 채널 내의 엔탈피 분포를 최적화하여 드라이아웃 출력을 향상시킨다.

중수로에서 출력이 드라이아웃 출력에 다다르게 되면 채널 내 핵연료가 손상될 수 있는데, 이 때 핵연료

손상이 발생되기 시작하는 채널 출력을 임계 채널 출력으로 정의하며, 그 비를 임계 채널 출력비라 부른다.

한편 핵연료 보호와 원자로 안전성 확보를 위해서는 임계 채널 출력비가 1 보다 커야 하고, 또한 원자로 운전시 이 기준을 넘지 못하도록 규정하고 있다.

이 기준을 국부 과출력 보호 기준(Regional Overpower Trip Setpoint)이라고 하며, 100% 원자로 출력에 대한 그 비율로 원자로의 운전 여유도를 나타낸다.

개량 핵연료 다발에서 버틴 사용에 따라 임계 출력이 높아지고, 그 결과로 임계 채널 출력이 5% 이상 증대된다(그림 2).

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

중수로에서는 수평으로 놓여 있는 채널 내에 12개 핵연료 다발이 장전되고, 또한 고온·고압의 냉각수가 흐르므로 원자로 연령이 증대할수록 주로 높은 출력을 발생하는 채널에서 크립이 발생하게 된다.

또한 원자로 고령화에 따라 증기발생기 세관에 이물질(crud) 누적기가 속화될 수 있다.

이 두 현상에 의해 원자로 입구 모관에서의 냉각수 온도가 상승하게 되며, 결과적으로 원자로 운전 여유도를

저하시키는 현상이 초래될 수 있다.

이러한 경우 CANFLEX 핵연료를 사용하면 원자로 운전 여유도 저하에 의한 출력 감소 운전에 대한 막대한 경제적 손실을 보상할 수 있다.

캐나다 포인트 러프러 원자력발전소에서는 이번에 개발된 개량 핵연료 (CANFLEX-NU)를 사용함에 따라 중수로 1기당 연평균 40억원 정도의 비용 절감 효과를 가져올 수 있을 것으로 추산하고 있다.

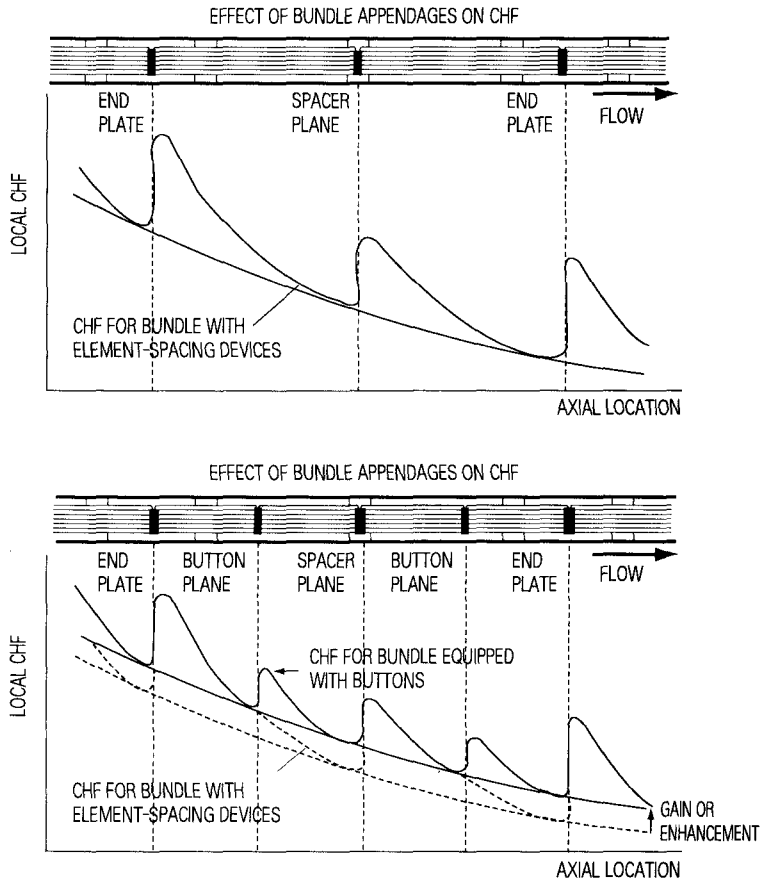
CANFLEX 핵연료 다발의 설계는 개발 초기의 설정 목표 중 하나로서 가능한 기존 핵연료 제조 시설과 기술을 사용하여 핵연료 제조비를 최소화할 수 있도록 최대한 고려하였다.

따라서 CANFLEX 핵연료는 기존 37개 핵연료 제조 시설의 생산 라인을 변경하지 않고 각 공정에 소요되는 소모적 부품을 변경하여 핵연료 다발 조립기를 새로 만들면 기존 기술로서 제조될 수 있다.

이에 따라 KAERI는 기존 핵연료 다발과 CANFLEX 핵연료 다발의 조립 용접을 다같이 수행할 수 있는 중수로용 핵연료 다발 자동 프로그램 용접기를 개발하는 부차적 성과도 달성하였다.

CANFLEX 핵연료다발의 검증 및 인허가용 시험 프로그램

CANFLEX 핵연료 다발의 설계 검증은 AECL 및 KAERI가 공동으로 수립한 「설계 검증 계획서(DVP :



〈그림 2〉 Effect of Bundle Appendages on CHF

Design Verification Plan)에 따른 검증 프로그램하에 수행되었다.

CANFLEX 핵연료의 검증 프로그램은 해석·시험·평가 등의 광범위한 전략적 업무로서 AECL 및 KAERI 양 기관에서 수행되어 왔다.

CANFLEX 핵연료의 설계 검증 계획서는 성능 요구 조건을 명시하고, 그 요구 조건이 충족되는 것을 검증하기 위하여 필요한 시험 혹은 해

석 및 평가 사항을 명시하며, 나아가 검증에 참여한 자의 책임과 업무 수행 절차를 명기하고 있는 것이다.

이 검증 계획서에는 시험시방서, 시험절차서, 검증 기준 등의 준비 사항과 필요한 문서도 명기되어 있다.

CANFLEX 핵연료 검증에 관련된 모든 시험과 해석은 캐나다 품질 기준 CAN/CAS-N286.2 혹은 이에 동등한 기준에 따라 수행하였다.



KAERI는 CANFLEX 핵연료의 가공 기술을 개발하였고, 약 100개의 시험용 핵연료 다발을 생산하여 KAERI 및 AECL에서 수행한 노내의 검증 시험에 사용하였다. KAERI는 CANFLEX 핵연료 다발의 내구성, 강도, 충격 및 핑류에 대한 수력학적 검증 시험을 수행하였다.

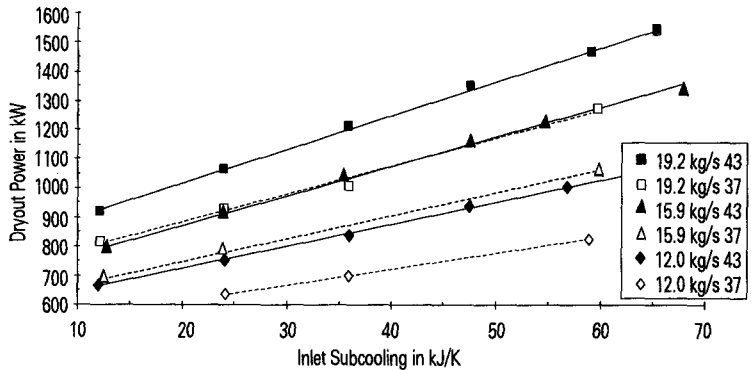
한편 AECL은 KAERI가 미확보하고 있는 연구 개발 시험 시설, 즉, 핵연료 노물리 특성 시험용인 ZED-2 임계 시험로, 핵연료 조사 성능 시험용인 NRU 연구로, 임계 열유속(CHF) 시험용인 Freon MR-3 Loop 등을 사용한 노내의 검증 및 특성 시험과 월성 원전에 사용하는 핵연료 장전기와의 양립성 시험을 수행하였다.

AECL은 동 Freon 임계열 유속 시험의 시험 핵연료를 제외한 모든 검증 시험을 위해 KAERI가 제공한 시험 핵연료 다발 및 혹은 부품을 사용하였다.

이러한 CANFLEX 핵연료 가공 및 검증 시험은 양 기관이 공동으로 심혈을 기울여 수행한 핵연료의 성능과 안전성에 대한 열적 및 기계적 성능 해석, 노물리 해석, 열수력 해석 및 안전성 해석 수행을 통해 설계된 개량 핵연료에 대한 검증을 하기 위함이었다.

AECL과 KAERI는 핵연료 다발열의 경수를 이용한 다발 임계 열유속(CHF) 시험 시설을 확보하지 못하

CANFLEX(Mk IV) vs 37-Element(CANDU-6) in Uncrept Flowtube at Various Flow Rates, Dryout Power vs Inlet Subcooling at 1.766 Mpa.



(그림 3) Dryout-Power Enhancement Ratio for the CANFLEX Fuel Bundle with respect to the 37-Element Bundle

고 있다.

따라서 양 기관은 98년 하반기에 CANFLEX-NU 핵연료 다발의 경수 임계 열유속 시험을 기존 37개 핵연료봉 다발열의 임계 열유속 실험을 수행한 캐나다 Stern Lab.에 공동으로 위탁하였다.

본 CANFLEX-NU 핵연료 다발열의 CHF 시험 프로그램의 목적은 CANFLEX 핵연료 열수력 설계/해석과 안전성 해석에 필요한 임계 열유속 자료와 압력 강하 자료를 얻고자 함이었다.

99년 5월 현재 CANFLEX-NU 핵연료 다발의 경수 임계 열유속 시험 결과에 의하면 CANFLEX-NU 핵연료의 임계 채널 출력이 기존 37개 핵연료봉 다발에 비하여 최소 6% 이상 증가하는 것으로 나타나고 있으며(

<그림 3> 참조), 또한 CANFLEX 핵연료 다발은 동일한 유동 조건에 있는 기존 37개 핵연료봉 다발에 비해 약 2%의 압력 강하가 작다(그림 4).

99년 5월 현재, KAERI 및 AECL에서 수행한 CANFLEX-NU 핵연료의 노내의 검증 시험 및 해석 결과는 월성 원전과 같은 기존 CANDU-6 원전 설계 요건에 충족하며, 기존 37개 천연 우라늄 핵연료봉 다발과 비교하여 핵연료 및 원자로의 안전 여유도가 향상되는 것을 보여주고 있다.

KAERI는 99년 5월 현재 정부의 설계 승인을 취득하기 위하여 97년 6월에 제출한 중수로용 개량 핵연료(CANFLEX-NU) 설계 보고서를 수정 보완한 최종 보고서를 심사 기관인 한국원자력안전기술원(KINS)에 제출함으로써 동 설계 승인의 인허가

마지막 수속 단계에 와 있다.

KAERI는 동 설계 승인을 취득하면 동 개량 핵연료의 국내 상용화를 촉진하기 위해 동 설계 승인을 관련 산업체인 한전원자력연료(주)에 이전할 예정이다.

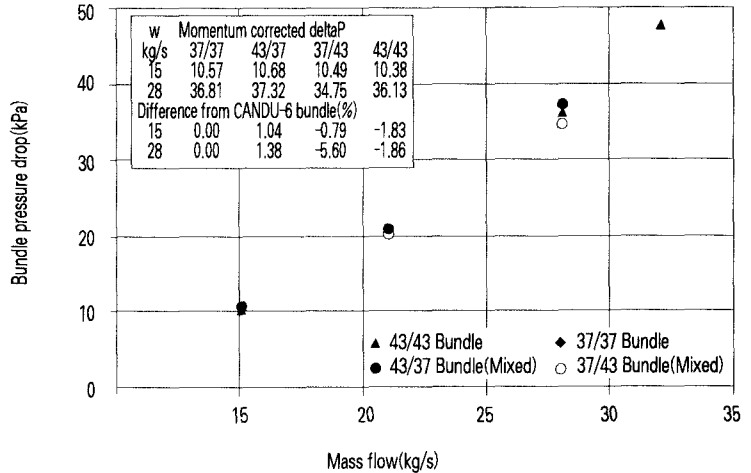
CANFLEX 핵연료 다발의 상용로 장전

98년 9월, 캐나다 New Brunswick 전력 회사의 Point Lepreau 원전에서는 CANFLEX-NU 핵연료를 월성로와 같은 CANDU-6 원전에 전량 장전하기 위한 최종 검증 단계로서 2년간의 CANFLEX-NU 핵연료 시범 조사 시험이 착수되었다.

본 핵연료 조사 시험의 목적은 CANFLEX-NU 핵연료가 CANDU-6 원전의 고출력, 출력 변화, 핵연료의 정상적인 노내 장전 체류 기간, 핵연료 교체에 따른 출력 급증, 냉각수 유동의 수력에 의한 핵연료 교체, 고연소 등에서도 그 건전성이 유지됨을 검증하고자 하는 것이다.

이에 따라 CANFLEX-NU 핵연료를 <그림 5> 및 <그림 6>과 같이 Point Lepreau 원전의 한 개의 고출력 채널과 한 개의 저출력 채널에 장전하기로 하였다.

이들 채널에서 장전 조사된 CANFLEX-NU 핵연료 다발들 중 고출력 채널에서 조사되어 제일 먼저 방출된 다발과 고출력 채널에서 가장



(그림 4) Pressure Drop for 37-, 43-, 37/43- and 43/37-element Bundles

기간 조사되어 방출된 다발, 저출력 채널에서 가장 기간 장전 조사된 한 개의 다발을 AECL의 조사 후 시험실로 수송하여 조사 후 비파괴, 파괴 및 연소도 검사 계획을 수립하였다.

이러한 상용로에의 시범 조사 계획에 따라 캐나다 Zircotec Precision Industries 핵연료 제조 회사는 98년 하반기 초에 26개의 CANFLEX-NU 핵연료 다발을 Point Lepreau 원전에 공급하였으며, 이와 동시에 캐나다 원자력 규제 기관인 AECB(Atomic Energy Control Board)에서는 Point Lepreau 원전에서의 CANFLEX-NU 핵연료 시범 조사를 인가하였다.

이러한 일련의 시험 핵연료 제조 및 인허가 과정의 후속 조치로 Point Lepreau 원전측이 동 원전의 S08 고출력 채널과 Q20 저출력 채널에 CANFLEX-NU 핵연료를 장전 조사

하기로 계획을 수립하여, 98년 9월 3일, 유량 계측기가 설치된 Q20 저출력 채널에 8개의 개량 핵연료(CANFLEX-NU)를 시범 장전한 것은 CANFLEX-NU 핵연료의 상업로 최초 장전이였다.

이로부터 3일 뒤 동 원전의 S08 고출력 핵연료 채널에 또 다른 8개의 개량 핵연료(CANFLEX-NU)를 장전하였다.

이 상업용 원자력발전소에 장전되어 조사되고 있는 CANFLEX-NU 핵연료의 최대 연소 시점 통과 여부와 이에 따른 노내 건전성 유지를 고려하여 장전일로부터 2개월 이상 연소된 98년 11월 17일 KAERI, AECL, New Brunswick 전력 회사, Zircotec Precision Industries 핵연료 제조 회사, 캐나다의 Hydro Quebec 전력 회사 등의 소장, 회장

등의 고위 기관 대표자와 더불어 관련 실무진이 참석하여 상업 원자력발전소에의 CANFLEX 핵연료 최초 장전 기념식을 캐나다 포인트 러프러 원자력발전소 현지에서 거행하였다.

또한 KAERI는 이번에 개발한 중수로용 개량 핵연료의 원자력발전소 전량 장전까지 포함한 핵연료 개발 관련 협력을 성공적으로 마무리하기 위해 AECL과의 공동 개발을 3년간 연장하기 위한 협정도 98년 11월 16일 체결하였다.

KAERI 및 AECL 공동 개발에 따른 CANFLEX 핵연료의 지적 소유권 및 상용권

KAERI는 특히 이번에 AECL과 핵연료를 공동 개발함에 따라 각 기관의 지적 소유권 및 제품 상용권을 자국에서 독점할 수 있으며, 제3국에서 상호 간섭없이 독자적으로 보유하게 되었다.

이러한 제3국 대상 지적 소유권 및 제품 상용권 확보는 우리 나라 핵연료 산업계에 처음 있는 일로, 이를 통해 우리 나라는 앞으로 중국·아르헨타나·터키 등 중수로 발전소 건설을 추진중에 있는 제3국 핵연료 시장에 단독 진출할 수 있는 교두보를 확보하게 되었다.

또한 이번에 개발된 핵연료는 기존 핵연료의 모방 또는 기술 도입이 아닌 순수 연구 개발로 달성된 새로운 핵연료이므로 국내 핵연료 인허가 심

Prior to first CANFLEX fuelling

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

After first 8 bundle CANFLEX fuelling(0 months)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

After second 8 bundle CANFLEX fuelling(~6 months)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

First 4 CANFLEX bundles into bay

After first 8 bundle 37-element CANFLEX fuelling(~12 months)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

8 CANFLEX bundles into bay

After second 8 bundle 37-element CANFLEX fuelling(~18 months)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

Last 4 CANFLEX bundles into bay

- # 37-element bundle
- # 1st fuelling of 8 CANFLEX bundles
- # 2nd fuelling of 8 CANFLEX bundles

A total of 16 CANFLEX bundles fuelled into the high power channel

(그림 5) Planned Fuelling History for High-power Channel

Prior to first CANFLEX fuelling

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

After first 8 bundle CANFLEX fuelling(0 months)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

After first 8 bundle 37-element bundle fuelling(~8 months)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

First 4 CANFLEX bundles into bay

After second 8 bundle 37-element fuelling(~16 months)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

Last 4 CANFLEX bundles into bay

- # 37-element bundle
- # 1st fuelling of 8 CANFLEX bundles

A total of 16 CANFLEX bundles fuelled into the low power channel

(그림 6) Planned Fuelling History for Low-power Channel

사 기관의 심사 능력도 향상시킬 수 있는 부수적 파급 효과도 있다.

CANFLEX-RU 핵연료 개발 현황

KAERI와 AECL은 중수로 원전의

안전성과 운전 여유도를 증대시키는 CANFLEX 천연 우라늄 핵연료 다발의 공동 개발이 완료되어가는 시점에서, 제2단계 공동 연구 개발 과제로서 CANFLEX 핵연료 다발의 안전성과 원전 운전 여유도 증대 등의

장점을 활용하고, 단·중기적으로 핵연료 경제성을 제고하여 기존 및 신규 중수로 원전의 발전 단가를 절감할 수 있는 순환 우라늄 사용 개량 핵연료(CANFLEX-RU) 개발을 선정하였으며, 이를 위해 96년 9월 「CANFLEX-0.9% 등가 저농축 우라늄 핵연료 공동개발 프로그램」 협정을 체결하였고, 또한 KAERI는, 96년 11월 영국 BNFL과 「중수로용 순환 우라늄 핵연료 공동 개발」 협정을 체결하였다.

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

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

이러한 순환 우라늄은 영국 및 프랑스 등의 서방 국가에서만 약 20,000톤 정도 누적되어 있는데, 이는 월성로와 같은 중수로 원전 1기에 500년 동안 사용할 수 있는 양이다.

2000년 전후로 그 누적량이 25,000톤으로 더 늘어날 것으로 추

산되며, 국제적 핵투명성을 갖는다.

이러한 순환 우라늄의 누적량에 향후 생산될 양까지 고려하면 전 세계 중수 원전에 약 30년 동안 충분히 활용할 수 있는 순환 우라늄 자원이 확보된다.

기 생산된 순환 우라늄의 국제적 자원은 국내에서 발생하는 사용후 경수로 핵연료의 재처리 문제와 연계하지 않고 중수로용 순환 우라늄 핵연료를 개발할 수 있는 여건과 국제적으로 용인될 수 있음을 말해주고 있다.

U-238, U-236, U-235, U-232 핵종 등이 포함된 순환 우라늄을 농축하여 경수로에 사용할 경우, 가연성 U-235 핵종의 연소도가 1% 정도로 감소되고 현재의 농축 경비가 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 낮은 율로 감소될 뿐만 아니라 농축이 전혀 필요하지 않으며, 현재 천연 우라늄 핵연료와 비교하여 연소도가 2배로 증가되고, 사용후 핵연료 발생량이 2배로 감소되므로 핵연료의 경제성이 향상되어 원전 발전 단가를 절감하는 데 커다란 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

특히 세계적으로 산재되어 있는 순환 우라늄의 가격은 단순한 저장으로 인한 보관 경비를 고려하여 천연 우라늄 가격보다 훨씬 저렴할 것으로 예상하고 있다.

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

KAERI는 BNFL로부터 전수한 순환 우라늄 분말을 이용하여 천연 우라늄보다 미량의 방사능이 많은 순환 우라늄의 취급 및 수송과 소결체 제조성을 규명하고, 또한 CANFLEX-RU 핵연료봉의 열적 및 기계적 성능 기준과 순환 우라늄 분말 및 소결체 시방을 설정하고 동 핵연료 다발 설계를 제안하여 기존 중수원전과의 노심 양립성·경제성 등을 포함한 순환 우라늄의 중수 원전 핵연료로서의 타당성 분석 및 평가를 보다 심도있게 수행하고 있다.

KAERI가 순환 우라늄 분말과 순환 우라늄 CANFLEX 핵연료 다발을 가공하여 방사능을 측정된 결과 기존 천연 우라늄 37 핵연료봉 다발의 방사능 대비 1.3 배 정도로 나타났다.

따라서 순환 우라늄을 중수 원전에 사용함에 있어서 원자로 설계 및 운전 요건에 충족함은 물론, 조사 전후 순환 우라늄 핵연료의 수송, 원전 및



가공 장소에의 취급 및 저장 등은 천연 우라늄과 다를 바 없는 것으로 나타났다.

현재까지의 예비 해석 결과에 의하면, 제안된 CANFLEX-RU 핵연료 다발 설계(안)의 노내 핵연료봉 건전성이 유지되고, CANDU-6 원전의 다발 및 핵연료 채널 출력과 반응도 기구의 반응도가 요건에 양립하며, 기존 천연 우라늄 37개 핵연료봉 다발 대비 열수력 여유도가 크게 향상되고, 가상 사고시의 안전성 측면에서도 규제 요건에 충족되는 것으로 나타났다.

KAERI는 캐나다의 AECL 및 영국의 BNFL과 협력하여 AECL의 NRU 연구로에 순환 핵연료 모사 출력 급증 조사 시험용 CANFLEX 핵연료 다발 1개를 99년 3월에 제작하여 현재 AECL로의 핵물질 수송을 위한 국제적 절차를 밟고 있다.

동 핵연료가 AECL에 도착하면 다발의 제원 확인 측정 및 제문서 검토 직후 NRU 연구로에 장전 조사가 착수될 예정이다.

따라서 중수로용 순환 우라늄 핵연료(CANFLEX-RU)가 2000년대 초기 상용 중수로에서의 시범 조사 실증이 끝나면, 중수로 원전의 최대 보유국인 캐나다를 포함한 우리나라의 중수로 원전에 또 하나의 개량 핵연료로 실용화될 것으로 전망된다.

특히 경중수를 동시에 보유하고 있는 우리나라에서는 국내에서 발생

된 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.

결 론

KAERI는 AECL과 협력하여 기존 37개 천연 우라늄 핵연료봉 다발과 비교하여 핵연료 및 원전의 안전 여유도를 향상시키는 CANFLEX-NU 핵연료를 지난 7년간에 걸쳐 개발하였다.

CANFLEX 핵연료는 한국과 캐나다의 연구 개발 기관이 협력하여 만들어진 것으로 우리나라에서 최초의 진정한 국제 협력 합작품이며, KAERI와 AECL의 심도있는 시험을 통하여 검증된 상품이다.

특히 캐나다 Point Lepreau 원전에서의 24개 CANFLEX-NU 핵연료 시범 조사는 기존 원전에 CANFLEX-NU 핵연료가 양립한다는 마지막 검증 시험이기도 하다.

CANFLEX-NU 핵연료 다발 열의 Freon 임계 열유속 시험 결과와 경수 임계 열유속 시험의 초기 결과에 의하면, CANFLEX-NU 핵연료를 고령화된 CANDU-6 원전에 사용하면 연간 막대한 경제적 보상이

나타날 것으로 예측되었다.

특히 CANFLEX-NU 핵연료의 경수 임계열유속 시험은 기존 37개 천연 우라늄 핵연료봉 다발 대비 핵연료의 안전성이 확인되며, 나아가 CANDU-6 원전에의 사용 여부를 결정하는 중요한 인자가 되어 많은 관심이 모아지고 있다.

KAERI는 중수로 원전의 안전성과 운전 여유도를 증대시키는 CANFLEX 천연 우라늄 핵연료 다발의 공동 개발이 완료되어가는 시점에서, 제2단계 공동 연구 개발 과제로서 CANFLEX 핵연료 다발의 안전성과 원전 운전 여유도 증대 등의 장점을 활용하고, 단·중기적으로 핵연료 경제성을 제고하여 기존 및 신규 중수로 원전의 발전 단가를 절감할 수 있는 순환 우라늄 사용 개량 핵연료(CANFLEX-RU)를 선정하여 이에 대한 개발 타당성을 현재 규명하고 있다.

현재까지의 순환 우라늄 핵연료 개발 타당성 분석 결과에 의하면, 순환 우라늄 핵연료는 중수 원자로 설계 및 운전 요건에 충족함은 물론, 조사 전후 순환 우라늄 핵연료의 수송, 원전 및 가공 장소에의 취급 및 저장 등은 천연 우라늄과 다를 바 없는 것으로 나타났으며, 순환 우라늄 사용시 저렴한 원자재비뿐만 아니라 연소도 증대에 따른 경제성 증가를 통해 중수로 1기당 연간 핵연료비를 50%~60% 정도(약 30억원) 절감할 수 있다는 것으로 예측되었다. ☞