

Technical and Economic Evaluations of CANDU Advanced Fuel Bundle Designs

H.C. Suk, W. Hwang, J.H. Park, B-G. Kim, K-S. Sim,
C.J. Jeong, Y.H. Heo, and J.S. Jun

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received April 26, 1990)

CANDU 改良 核燃料 設計 方案 分析

석호천, 황 완, 박주환, 김봉구, 심기섭, 정창준, 허영호, 전지수

한국원자력연구소

(1990. 4. 26 접수)

Abstract

As a principal design of advanced CANDU fuel bundle, CANDU-KF39, CANDU-KF40 and CANDU-KF43 fuel bundles were proposed and evaluated with respect to the operating conditions of the CANDU-6 reactor of Wolsung Unit-1. From the results, the advanced fuel bundles show to be improved economical and technical benefits compared with the current 37-element bundle. Especially, it was appeared that the KF-39 fuel bundle has more benefits of the safety, technical and economical aspects of Wolsung Unit-1 rather than those of the KF-40 and KF-43 fuel bundles.

요 약

CANDU 개량 핵연료집합체의 대표적인 방안들로서 CANDU-KF39(39개, 이원봉), CANDU-KF40(40개, 이원봉) 및 CANDU-KF43(43개, 이원봉) 핵연료집합체들을 설정하여 월성 1호기 CANDU-6 원자로 가동조건에 따라 분석/평가하였다. 본 분석 결과에 의하면, 본 개량 핵연료집합체들은 기존 37개 핵연료봉 집합체보다 기술 및 경제적으로 우수하며, 특히 CANDU-KF39 개량 핵연료집합체는 CANDU-KF40 및 CANDU-KF43 개량 핵연료집합체 보다 월성 1호기 안전성, 기술성, 및 경제성 향상의 모든 조건에 제일 충족될 것으로 예상된다.

1. 서 론

한국원자력연구소(KAERI)에서는 1987년부터 월성 1호기용 CANDU 개량 핵연료집합체 개발을 착수하여 현재 수행하고 있다[1]. KAERI의 본 CANDU 개량 핵연료집합체 개발목적은, 국내의 기존 및 신규 CANDU 원자로에 천연 우라늄 핵연료 및 개량

핵연료를 사용하여, 원자로 및 핵연료의 성능 및 안전성, 기술성, 경제성 등을 제고시킬 수 있는 핵연료를 개발하는 것이다. 이러한 목적하에 여러가지 방안들을 검토한 결과, 현재까지 구명된 KAERI의 CANDU 改良 核燃料集合體에 대한 대표적인 방안

들은 39개 이원봉(CANDU-KF39) 핵연료집합체, 40개 이원봉(CANDU-KF40) 핵연료집합체, 43개 이원봉(CANDU-KF43) 핵연료집합체이다. 한편 캐나다 AECL에서는 1986년부터 기존 원자로 및 차세대/개량 원자로용으로, 특히, 1.5wt% U-235 이하의 SEU(Slightly Enriched Uranium) 핵연료를 도입한 43개 이원봉 핵연료집합체인 소위 "CANFLEX" (CANdu FLEXible) 개량 핵연료집합체를 개발하고 있다[2]. 이 CANFLEX 개량 핵연료집합체의 제원 및 특성 등은 자세히 알려져 있지 않으나, 그 핵연료봉 배열은 본 CANDU-KF43 핵연료집합체의 것과 유사하다고 판단된다.

AECL의 연구결과 [2]에 의하면, 현 CANDU 원자로에서는 NU(Natural Uranium), SEU, TANDEM, Pu/NU, Pu/Th, MEU/Th 핵연료주기들 중에 SEU는 경제성이 우수하며, TANDEM 핵연료주기는 우라늄 이용율 면에서 우수하고, 특히 1.2wt% SEU 핵연료는 우라늄 이용율 및 경제성 향상측면에서 최적이라는 것이 보고 된바 있다. 80% capacity factor으로 운전된 15 GWe CANDU 원자로에서는, NU 핵연료(방출연소도 : 7,300 MWd/MTU)와 비교하여, 0.9wt% SEU 및 1.2wt% SEU 핵연료는 방출연소도가 13940MWd/MTU 및 22840 MWd/MTU로 증가가 예상됨으로써, 각각 85~160 백만과 100~200 백만 Canadian \$의 핵연료주기비 절감이 추산된다. 여기에서는 본 개량 핵연료 집합체들의 특성과, 0.711 wt% NU, 0.90 wt% SEU 및 1.20 wt% SEU 핵연료 경우의 각 핵연료 집합체에 대한 안전성, 기술성 및 경제성 분석 결과를 기술하였다.

2. 설계 기준 및 기하학적 구조

본 CANDU 개량 핵연료집합체의 설계 기준은 기존 및 개량 CANDU 원자로에 양립하는 것으로써 "(a) 900 kW의 핵연료집합체 출력에서 57kW/m 이하의 핵연료봉 최대 선출력 유지, (b) 지지체를 포함한 핵연료집합체의 최대 직경을 102.50mm, (c) 핵연료봉과 압력관의 최소 간격과 핵연료봉 사이의 최소 간격을 각각 1.22mm 및 1.55mm, (d) 핵연료봉의 외경을 10mm 이상을 유지한다" 등이다. 이러한 설계기준에 따라 제안된 CANDU 개량 핵연료집합체의 대표적인 설계방안은 그림 1과 같은 이원봉 개량 핵연료집합체들이다.

CANDU-KF39, KF40 및 -KF43 이원봉 개량 핵연료집합체들의 단위 길이당의 핵연료대 피복관의 체적비는, 기존 핵연료집합체의 것보다 15% 증가되었으며, 각각 8.08, 8.29 및 8.01이다. CANDU-KF40 외환 핵연료봉과 CANDU-KF43 외환/중간환 핵연료봉의 공칭외경은 기존 핵연료봉의 것보다 12.5% 작고, CANDU-KF39 외환 핵연료봉의 공칭외경은 기존 핵연료봉 것보다 8.4% 작다. CANDU-KF39 중간환/내환/중심의 핵연료봉, CANDU-KF40 중간환/내환/중심의 핵연료봉 및 CANDU-KF43 내환/중심의 핵연료봉의 공칭외경은 기존 핵연료봉 것보다 각각 2.50%, 4.50% 및 5.20% 만큼 크다. CANDU-KF40 및 -KF43 외환봉의 핵연료피복관 두께는 CANDU-KF39 외환봉의 것보다 8.3%만큼 얇다.

3. 핵적 거동 특성

월성로용 핵연료집합체 설계/해석 관련 문헌들[3, 4]의 지침과 반응도 및 핵연료집합체의 핵적특성을 계산할 수 있는 WIMS-D4 전산코드[5]를 이용하여, 월성 1호기 노심을 기준으로, 본 기존 및 개량 핵연료집합체들에 대한 연소도에 따른 반응도(k_{eff}) (그림 2참조), 핵연료봉 선출력(그림 3 및 4참조), 노심 평균 핵연료 방출연소도 등을 추정하였다. 이 추정 결과는, 표 1과 같이, 기존 핵연료집합체의 주요 핵적특성에 대한 본 개량 핵연료집합체들의 상대 핵적 특성으로 요약될 수 있다.

CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 개량 핵연료봉들의 최대 선출력은 기존 핵연료봉의 것보다 각각 평균 14.1%, 10.5% 및 15.1% 만큼 낮다. 이 핵연료봉들의 출력이력에서 한가지 특이한 사항은, 그림 2에 도시된 바와 같이, CANDU-KF43 내환 핵연료봉의 선출력이 약 8,000 MWd/MTU 연소 시점부터 CANDU-KF39 핵연료봉의 것보다 높아진다. CANDU-KF40 및 -KF43 외환 핵연료봉의 최대 선출력은 CANDU-KF39 외환 핵연료봉의 것보다 6.4% 낮다. 특히, CANDU-KF43 개량 핵연료집합체의 핵연료봉 최대 선출력은, AECL의 CANFLEX 개량 핵연료집합체의 것[2]과 같이, 주어진 핵연료집합체의 출력에서 연소도에 따라 기존 핵연료집합체의 것보다 10~20% 낮다. NU CANDU-KF39 및 -KF40 핵연료집합체는 기존 핵연료집합체보다 각각

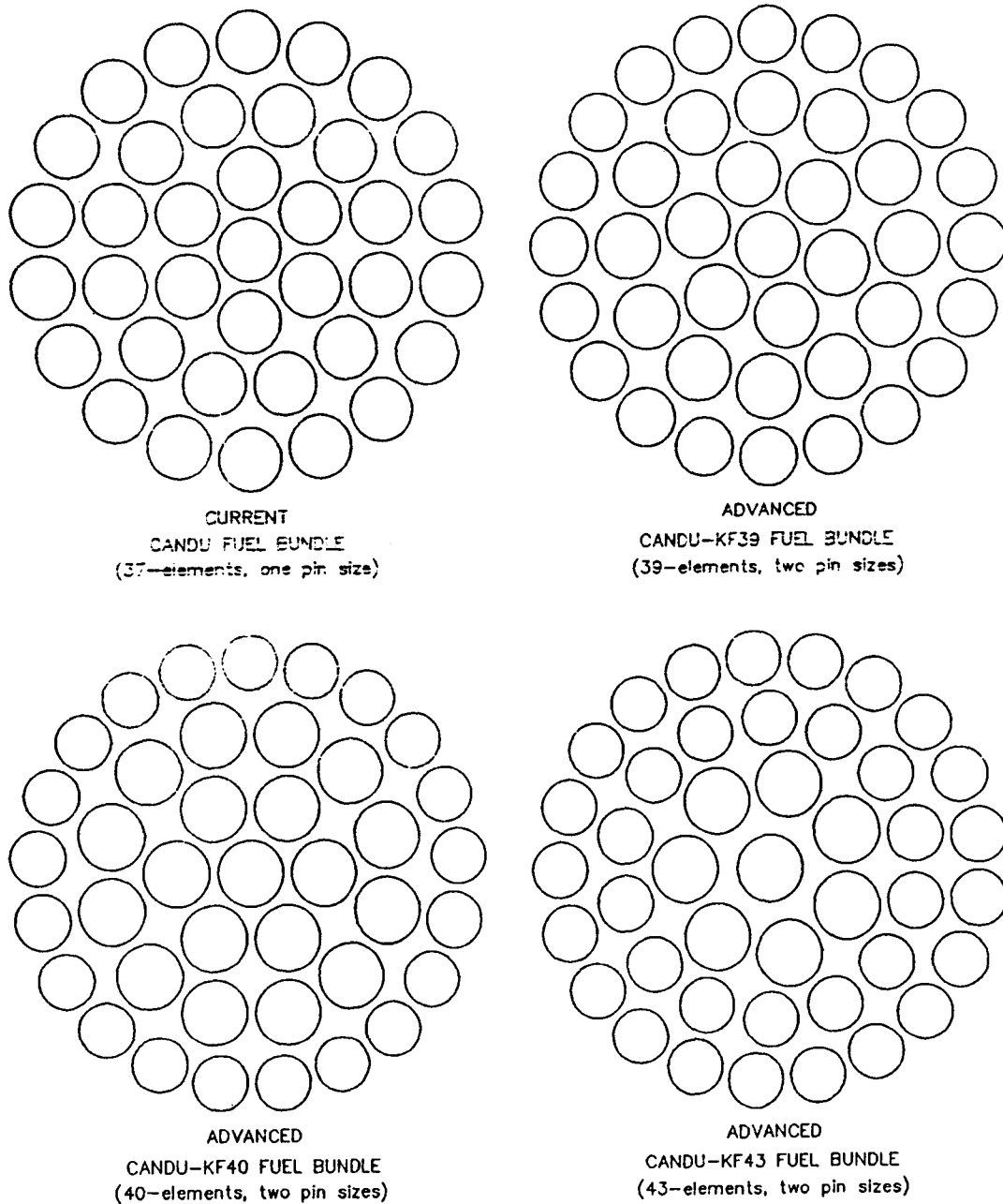


Fig. 1 Fuel Rod Arrangements of the Current and Advanced Fuel Bundles for CANDU-6 Reactor.

1.42% 및 1.85%의 우라늄 단위 무게당 노심평균 방출연소도 증가와 각각 2.5% 및 3.2%의 단위 집합체당 노심평균 방출연소도 증가를 보인다. 그러나 NU CANDU-KF43 핵연료집합체는 0.3%의 우라늄 단위 무게당 노심평균 방출연소도 증가를 보이지만,

2.1%의 단위 집합체당 노심 평균 방출연소도 손실을 보인다. 상기한 SEU CANDU-KF39 및 -KF40 핵연료집합체의 우라늄 단위 무게당 및 단위 집합체당 노심평균 방출연소도는 SEU 기존 핵연료집합체의 것보다 증가되지만, CANDU-KF43 핵연료집합

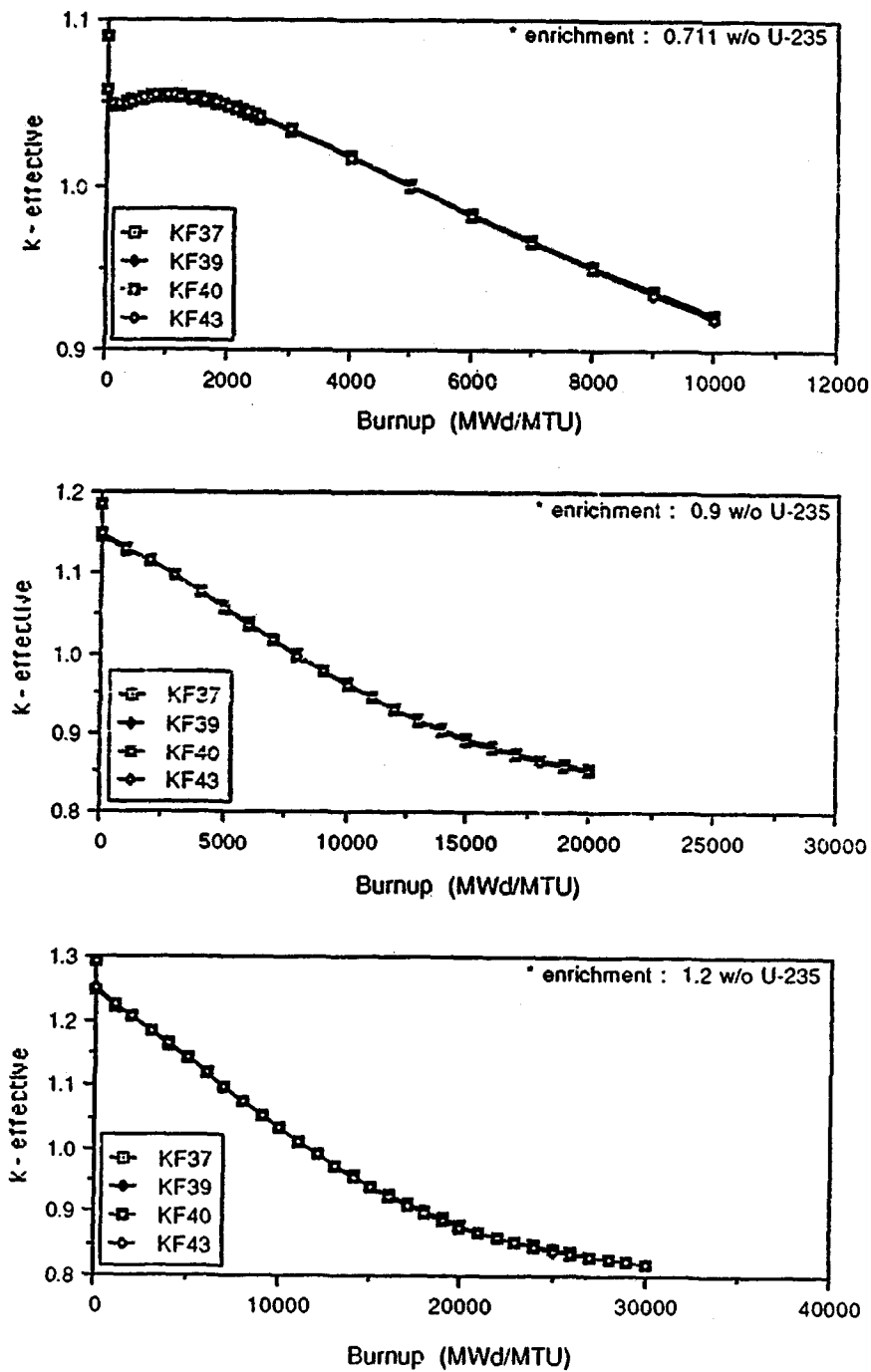


Fig. 2 k -effective vs. Burnup of CANDU Current and Advanced Fuel Bundles

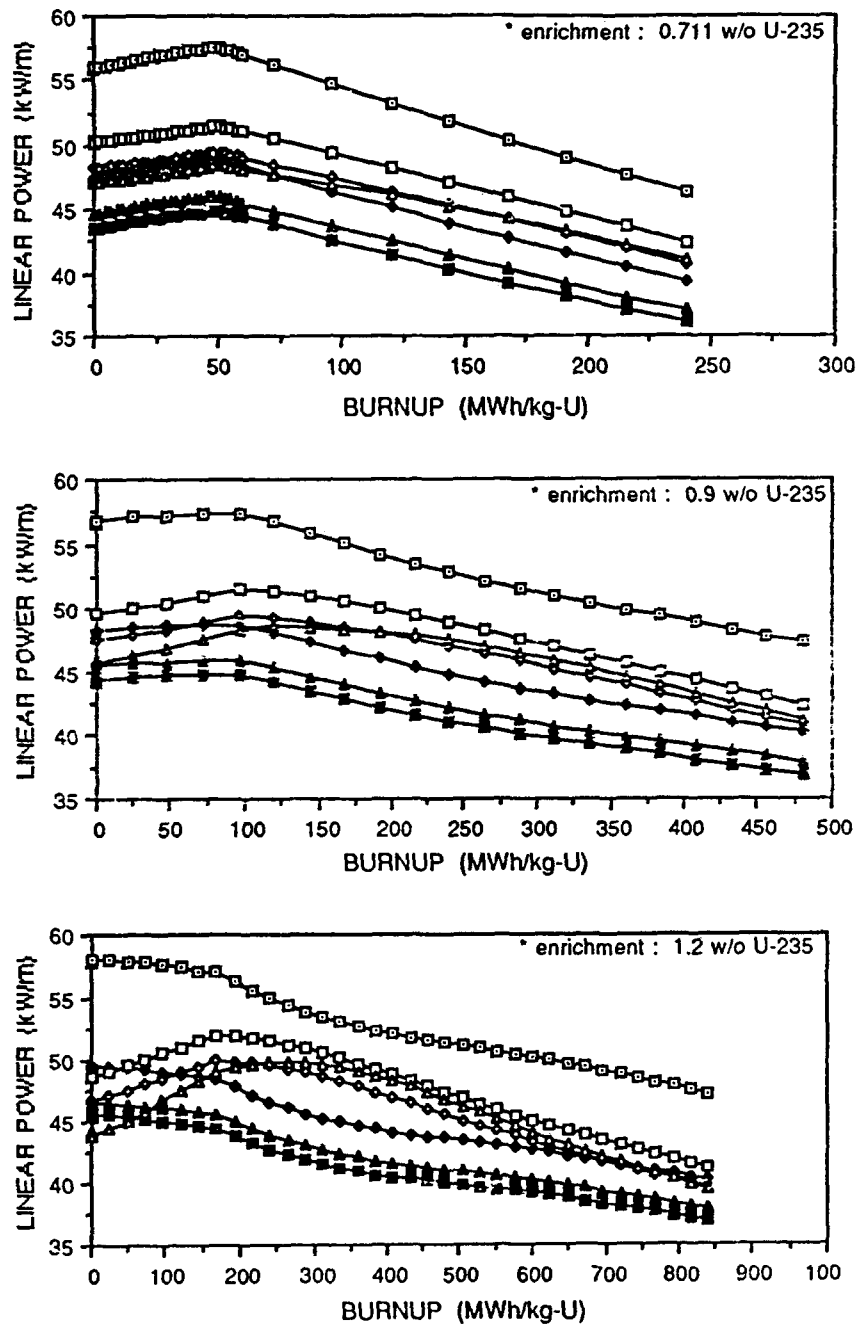


Fig. 3 Linear Heat Generating Rate vs. Burnup of CANDU Current and Advanced Fuel Bundles at 112.5% Full-Overpower Condition : 37-4th, 39-3rd, 39-4th, 40-3rd, 40-4th, 43-2nd, 43-4th.

A. Linear Element Power Ratings for 0.711 wt% NU Fuel

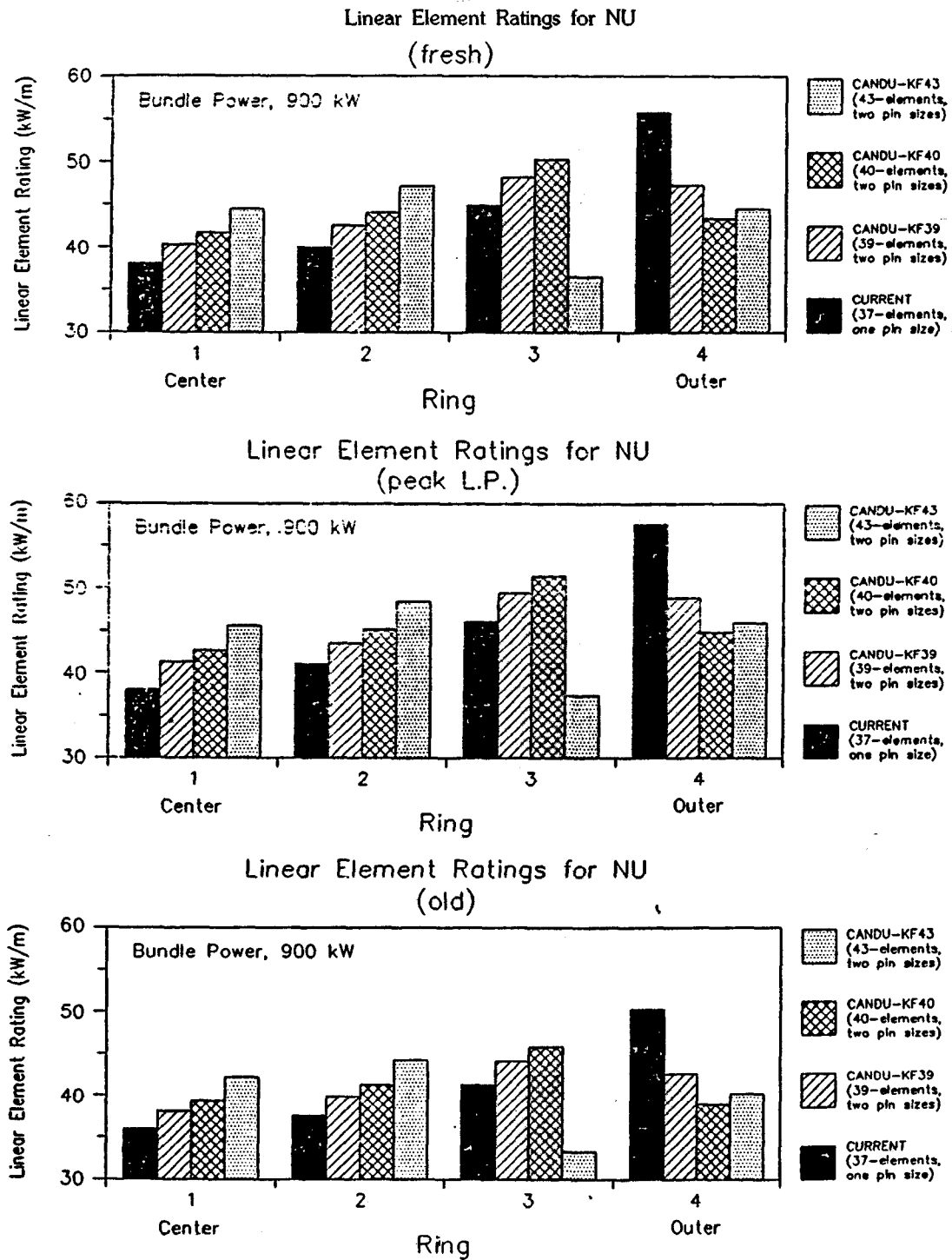


Fig. 4 Comparison of 37-elements, CANDU-KF39, -KF40 and -KF43 Linear Element Power Ratings.

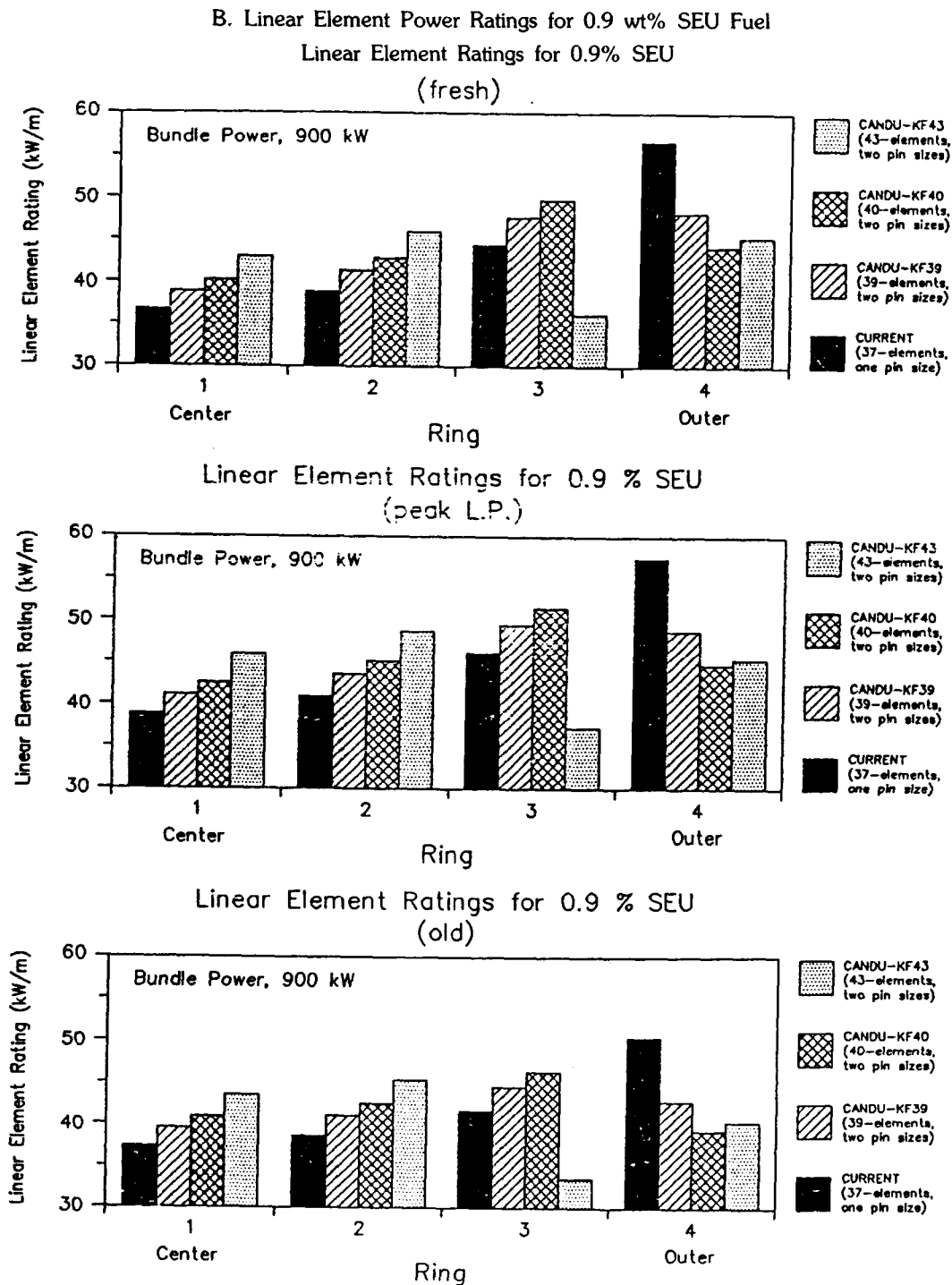


Fig. 4 Comparison of 37-elements, CANDU-KF39, KF40 and -KF43 Linear Element Power Ratings.

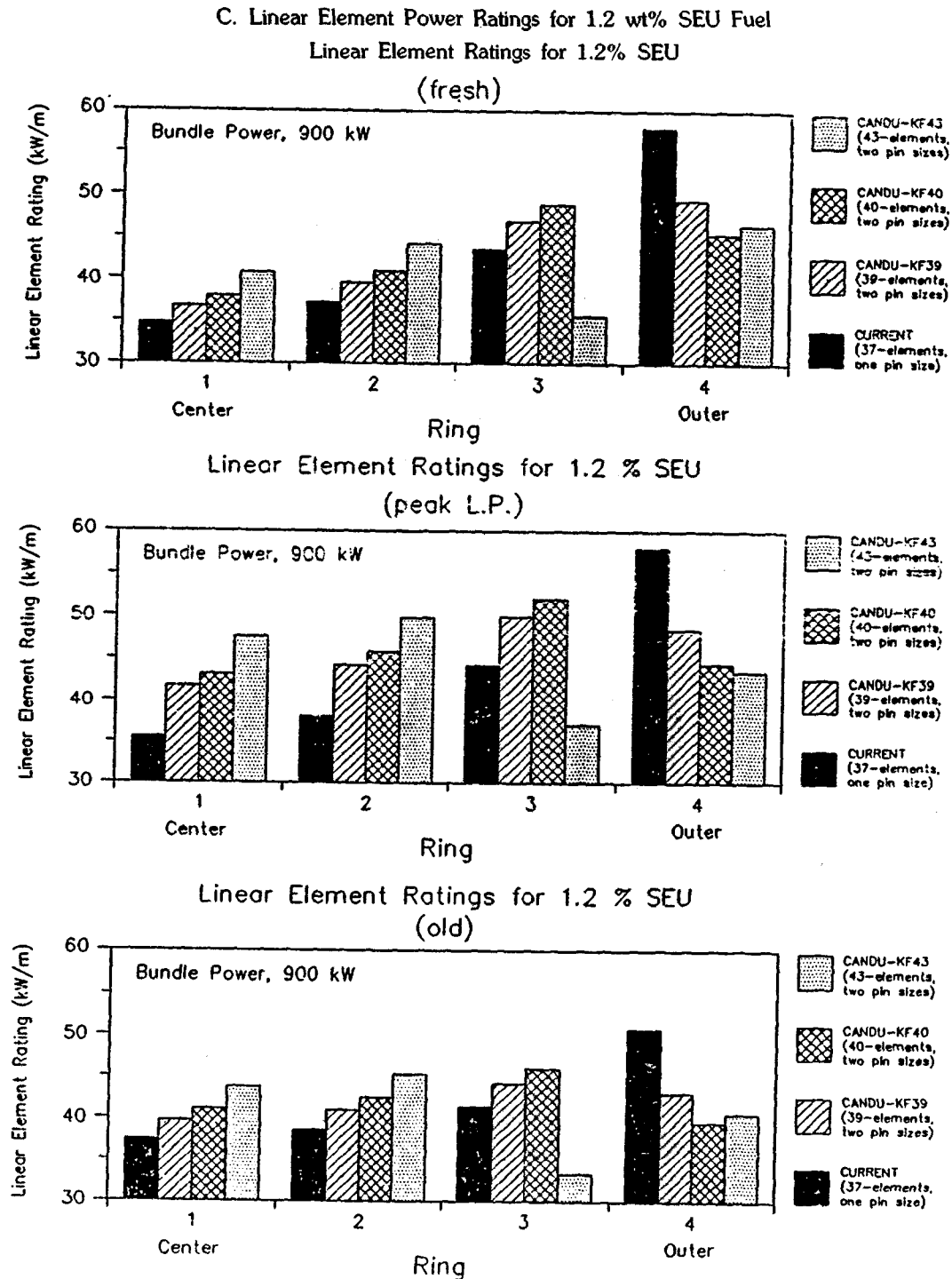


Fig. 4 Comparison of 37-elements, CANDU-KF39, KF40 and -KF43 Linear Element Power Ratings.

Table 1. Relative Nuclear-Characteristics of CANDU Advanced Fuel Bundles with Respect to the Current 37-Element Bundle

	KAERI CANDU-KF39 Bundle	KAERI CANDU-KF40 Bundle	KAERI CANDU-KF43 Bundle	AECL CANFLEX Bundle [2]
○ PEAK LINEAR ELEMENT POWER REDUCTION RATE				
• Element position	3rd ring	3rd ring	2nd ring	
• 0.711 wt% NU fuel	14.1%	10.5%	15.8%	(10~20%,
• 0.90 wt% SEU fuel	13.9%	10.3%	15.2%	depending
• 1.20 wt% SEU fuel	14.2%	10.6%	14.4%	on burnup)
○ PEAK LINEAR 4TH-RING-ELEMENT POWER REDUCTION RATE				
• 0.711 wt% NU fuel	15.1%	22.0%	20.1%	
• 0.90 wt% SEU fuel	15.1%	22.1%	20.1%	
• 1.20 wt% SEU fuel	14.8%	21.6%	19.9%	
○ AVERAGE DISCHARGE BURNUP IMPROVEMENT				
• 0.711 wt% NU fuel				
-MWd/MTU	1.42%	1.85%	0.29%	
-MWd/bundle	2.50%	3.20%	-2.10%	
• 0.90 wt% SEU fuel				
-MWd/MTU	0.64%	0.86%	-0.01%	
-MWd/bundle	1.72%	2.20%	-2.39%	
• 1.20 wt% SEU fuel				
-MWd/MTU	0.45%	0.61%	-0.07%	
-MWd/bundle	1.52%	1.95%	-2.45%	

체의 것은 손실이 있다.

4. 핵연료봉 노내 성능 및 건전성 특성

본 성능 및 건전성 분석/평가를 위한 핵연료봉의 노내 거주 최대 연소도는 상기한 노심평균 핵연료 방출연소도의 1.5배로 취하고, 그 출력은 핵연료봉의 성능보장 측면의 출력이력인 전 연소도 기간의 10% 이내 범위에서 112.5% 과출력 운전을 하는 부분 과출력과 핵연료봉의 건전성 측면의 출력이력인 전 연소도 기간 112.5% 과출력 운전을 하는 완전 과출력으로 고려되었다. 본 분석에는 부분 과출력 운전 구간을 핵연료봉의 최대 선출력을 포함한 10% 구간과 연소 말기의 10% 구간으로 택하였다.

본 기존 핵연료봉과 개량 핵연료봉들의 성능 및 건전성 분석을 상기한 핵연료봉의 제원 및 출력이력과 CANDU 핵연료봉 성능해석용 KAFEPa 전산코드 [6]를 이용하여 수행하였으며, 그 주요 결과는 다음과 같다.

기존 핵연료봉에 대한 개량 핵연료봉들의 핵연료 최대온도 및 핵분열생성물 최대방출율의 상대치는 표 2와 같고, 그 최대선출력이 나타난 핵연료봉들에 대한 연소도 함수의 핵연료 온도 분포는 그림 5와 같다. 표 2에 제시된 바와 같이, NU 핵연료 경우, CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 핵연료 최대온도는 기존 핵연료봉의 것보다 각각 15.8%, 12.3% 및 17.9% 낮고, 또한 이들 핵연료의 핵분열생성물 최

Table 2. Relative Values of the Maximum Fuel-Temperatures and Fission Gas Release Rates of CANDU Advanced Fuel Bundles with Respect to the Current 37-Element Bundle

	Enrichment (wt%)	Element of 37-element bundle	Element of CANDU-KF39 bundle	Element of CANDU-KF40 bundle	Element of CANDU-KF43 bundle
Maximum fuel-center-temperature	0.711	1	0.842	0.877	0.821
	0.90	1	0.845	0.891	0.851
	1.20	1	0.866	0.943	0.893
Maximum fission-gas-release	0.711	1	0.349	0.487	0.321
	0.90	1	0.650	0.774	0.739
	1.20	1	0.711	1.851	0.757

대방출율은 각각 65.1%, 51.3% 및 67.9% 낮다. 0.90 wt% SEU 핵연료 경우, CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 핵연료들의 최대온도는 기존 핵연료들의 것보다 각각 15.5%, 10.9% 및 14.9% 낮고, 또한 이들 핵연료의 핵분열 생성물 최대방출율은 각각 35.0%, 22.6% 및 26.1% 낮다. 1.20wt% SEU 핵연료 경우, CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 핵연료들의 최대온도는 기존 핵연료들의 것보다 각각 13.4%, 5.7% 및 10.7% 낮고, CANDU -KF39 및 -KF43 핵연료의 핵분열생성물 최대방출율은 각각 28.9% 및 24.3% 낮으나, CANDU-KF43 핵연료의 핵분열생성물 최대방출율은 85% 만큼 높다.

본 개량 핵연료들의 성능 및 건전성 평가기준은 다음과 같다: (a) 기준 I: 핵연료봉은, 주어진 전 연소기간 동안 112.5% 완전 과출력 조건(full overpower condition)으로 조사시, 동 원자로의 냉각재 압력 초과가 허용되나, 이때 핵연료피복관은 10^{-9} /sec의 변형도에 해당되는 응력의 50% 이하로 유지되어야 하며, 또한 그 핵연료피복관의 소성변형도 증가량이 0.3% 이하로 유지되어야 한다; (b) 기준 II: 핵연료봉이 주어진 전 연소기간의 10% 이내에서 112.5% 부분 과출력 조건(partial overpower condition)으로 조사시, 핵연료봉 내압은 냉각재 압력이하로 유지되어야 한다. 본 기준 I은 핵연료봉의 건전성 보장에 관한 기준이며, 본 기준 II는 핵연료봉 성능 보장에 관한 기준이다.

월성 1호기의 1차 냉각재 압력(10.6 MPa)에 대한 112.5% 완전 과출력이력에 따른 기존 및 개량 핵연

료봉들의 봉내압 분포 및 최대 봉내압 상대치는 그림 6 및 표 3과 같다. NU 핵연료 경우, 모든 핵연료봉들의 최대 봉내압은 그 냉각재 압력보다 낮고, 0.90wt% SEU 핵연료 경우, 기존 및 개량 핵연료들 중에서 단지 CANDU-KF39 핵연료봉만이 냉각재 압력보다 낮다. 1.20wt% SEU 핵연료 경우, 모든 핵연료봉들의 최대 봉내압은 그 냉각재 압력보다 높으나, 이에 따라 계산된 모든 핵연료피복관들의 응력여유도는 표 4 및 그림 7과 같이 아직 잔존한다. 따라서 기존 및 개량 핵연료봉들의 건전성은 유지될 것으로 판단되며, 특히 CANDU-KF39 핵연료피복관의 응력여유도는 나머지 기존 및 개량 핵연료 피복관의 것보다 현저하게 높다. 또한, 1.20wt% SEU 핵연료 경우에 있어서, 부분 과출력이력 조건하에서의 기존 및 개량 핵연료봉 내압들(그림 8 참조)을 그 냉각재 압력과 비교하면 표 5와 같으며, 단지 CANDU-KF39 핵연료봉 내압만이 냉각재 압력보다 낮다.

여기서 한가지 주지할 사항은 "SEU 핵연료 경우, CANDU-KF39 핵연료봉의 최대선출력은 CANDU-KF43 핵연료봉의 것보다 높지만, CANDU-KF39 핵연료봉의 핵연료 최대온도, 최대 봉내압 등이 CANDU-KF43 핵연료봉의 것보다 낮다"는 것이다. 이것은 그림 3의 출력이력과 이에 따라 그림 5의 핵연료 온도 분포에 나타난 바와 같이, 약 8,000 MWd/MTU 내외의 연소지점부터 CANDU-KF39 핵연료봉의 선출력이 CANDU-KF43 핵연료봉의 것보다 낮고, 두 핵연료 집합체의

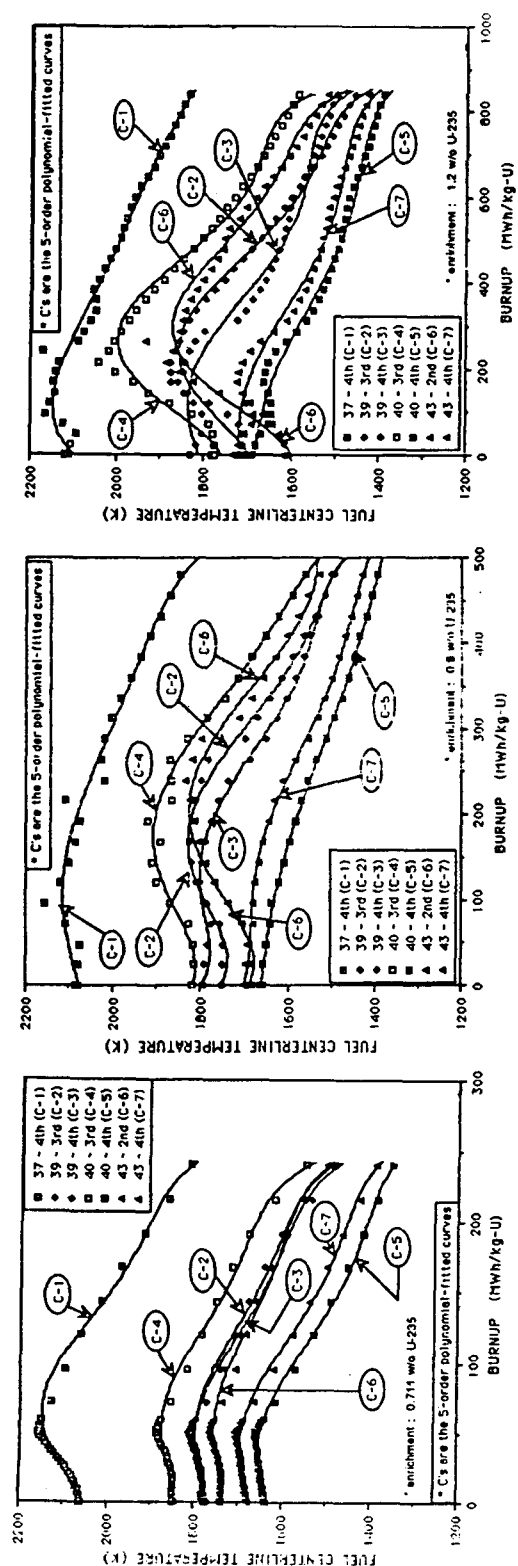


Fig. 5 Calculated Fuel Centerline Temperatures vs. Burnup of the CANDU Current and Advanced Fuel Bundles under 112.5% Full Overpower Condition

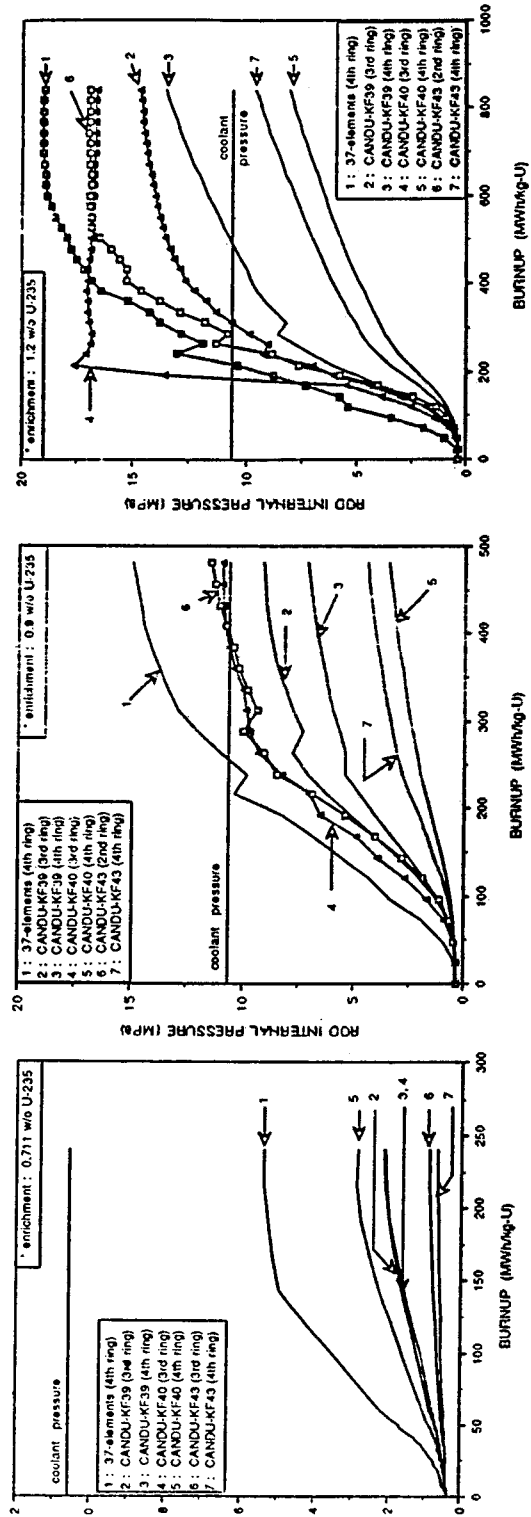


Fig. 6 Calculated Element Internal Pressures vs. Burnup of the CANDU Current and Advanced Fuel Bundles under 112.5% Full Overpower Condition

Table 3. Comparison of the Maximum Rod Internal Pressures of CANDU Advanced Fuel Bundles with That of 37-Element Bundle and Coolant Pressure under 112.5% Full-Overpower Condition

ENRICHMENT	0.711wt%	0.90 wt%	1.20 wt%	REMARKS
BURNUP	10,000	20,000	35,000	Burnup(MWd/MTU) to be exceeded the element internal pressure than the coolant pressure
ELEMENT(RING NO.)	MWd/MTU	MWd/MTU	MWd/MTU	
37-element (4th)	0.505	1.408*	1.791**	*11,000 ; ** 9,000
CANDU-KF39 (3rd)	0.197	0.897	1.384**	**13,000
CANDU-KF39 (4th)	0.112	0.667	1.278**	**21,000
CANDU-KF40 (3rd)	0.269	1.031*	1.607**	*16,000 ** 7,600
CANDU-KF40 (4th)	0.062	0.323	0.760	
CANDU-KF43 (2nd)	0.203	1.078*	1.597**	*17,000 **12,000
CANDU-KF43 (4th)	0.083	0.418	0.902	

Table 4. Clad Stress Margin of 1.20 wt% Enrichment Fuel Elements at the Burnup of 35,000 MWd/MTU

Element(Ring No.)	Clad Stress Margin(Relative Margin) at 3500 MWd/MTU
• 37-element (4th)	17.458 MPa(1)
• CANDU-KF39(3rd)	90.637 MPa(5.192)
• CANDU-KF40(3rd)	49.113 MPa(2.813)
• CANDU-KF43(2nd)	38.923 MPa(2.183)

반경방향 출력 평탄화와 연소도에 따른 선출력 이력 이 서로 다르기 때문이다.

5. 열·수력학 및 노심 관리 고찰

본 개량 핵연료집합체의 CCP(Critical Channel Power) 상승 효과를 월성로의 열·수력 해석용 KATHA 전산코드 [7]로 추정하면, 본 CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 개량 핵연료집합체들의 CCP 상승효과는 기존 핵연료집합체의 CCP와 비교하여 각각 5.07%, 5.51% 및 7.54% 이었다. AECL 보고[2]에 의하면, 본 CANDU-KF43 개량 핵연료집합체의 구조와 동일한 AECL의 CANFLEX 개량 핵연료집합체의 CCP 효과는 기존 핵연료집합체의 것보다 일반적으로 8% 높다. 따라서 이들 개량 핵연료집합체들 중에서는 CANDU-KF43 핵연료집합체의 CCP 상승효과가 제일 우수하다. 그러나, CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 개량 핵연

료집합체들의 유효면적이 기존 핵연료집합체의 것보다 각각 1.105%, 0.837% 및 5.392% 만큼 크기 때문에 핵연료집합체와 월성로와의 수력학적 양립성(예: 핵연료집합체의 압력강하조건)을 충족하기에는 CANDU-KF39 개량 핵연료 집합체가 제일 우수하다고 예상된다. 상기한 8%의 CCP 상승효과는 MWd/MTU 단위의 2% 연소도를 증가시킬 수 있다. 여기서 한가지 유의할 점은 만약 CCP 상승효과 만큼의 핵연료의 연소도를 증가시키면, CCP 상승효과 만큼의 핵연료 및 원자로의 운전 용통성 및 안전성 향상은 소멸된다는 것이다.

본 개량 핵연료 집합체들은 월성로 기준으로 0.711 wt%, 0.90 wt%, 1.20 wt%의 핵연료 농축도에 따라 각각 8-, 4-, 2-bundle shift의 핵연료 교체가 가능하다[1]. 월성로와 같은 기존 및 신규 원자로에의 1.0 wt% 이하 SEU 핵연료집합체 노심관리는 용이하게 수행될 것으로 판단되나, 1.0 wt% 이상의

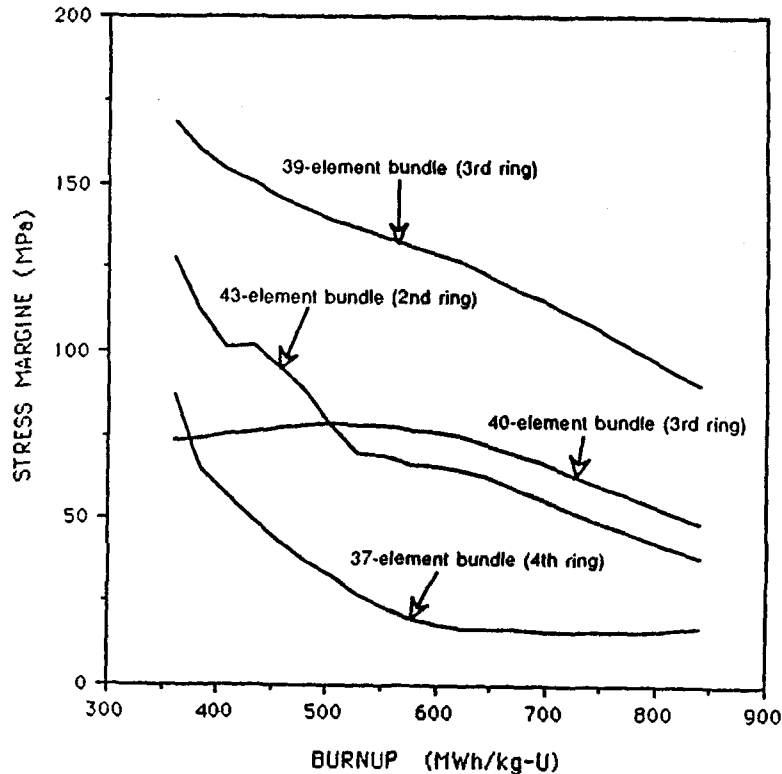


Fig. 7 Calculated Clad Stress Margine of CANDU Current and Advanced Fuel Bundles for MOL and EOL at 112.5% Full-Overpower Operation (enrichment : 1.2 w/o U-235)

SEU 핵연료집합체의 노심관리는 AECL에서 보고한[8] "Checkerboard Fuel Management (근본적으로 2 bundle shift 개념의 노심 핵연료관리 기술임)" 혹은 "Axial Fuel Shuffling"으로 수행되어야 할 것으로 예상된다.

6. 핵연료 주기비 특성

본 CANDU 기존 및 개량 핵연료집합체들에 대한 once-through 핵연료주기비를 추산하기 위하여 관련된 부품 및 기타 비용은 표 6 및 7과 같이 가정하였다. 이러한 가정하에 본 기존 핵연료집합체의 핵연료주기비와 기타 주요 경제성 인자에 대한 개량 핵연료집합체들의 상대적 계산결과를 요약하면 표 8과 같다. 본 개량 핵연료집합체들중의 CANDU-KF40 핵연료집합체는 그 핵연료봉의 핵적 특성과 노내 성능 및 전전성이 CANDU-KF39 및 KF43 핵연료봉

의 것보다 우수하지 못하고, 또한 그 경제성도 CANDU-39 핵연료집합체의 경제성보다 우수하다고 판단되지 않는다. 이에 따라 CANDU-KF39 및 KF43 개량 핵연료집합체들 만의 경제성을 상호 비교/검토하면 다음과 같다.

6.1 CCP 상승효과에 따른 연소도 증가를 무시한 NU 개량 핵연료집합체의 경제성·년간 핵연료비

CANDU-KF39 개량 핵연료집합체의 연간 핵연료비는 NU 기존 핵연료집합체의 것보다 최대 1.03% (122,000 US \$)의 절감에서 최소 0.09% (10,600 US \$)의 손실이 예상되며, CANDU-KF43 개량 핵연료집합체의 연간 핵연료비는 최소 0.57% (67,000 US \$)에서 최대 6.41% (760,000 US \$)의 손실이 예상된다. 여기의 CANDU-KF39 핵연료집합체의 0.09% (10,600 US \$)년간 최대 핵연료비 손실치는,

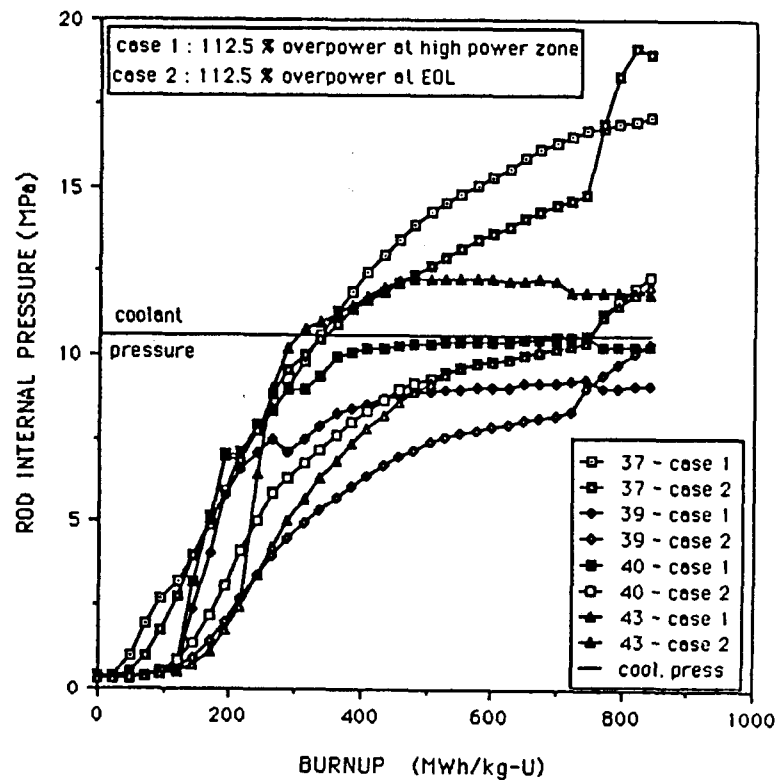


Fig. 8 Calculated Rod Internal Pressure vs. Burnup of CANDU Current and Advanced Fuel Bundles under 112.5% Partial-Overpower Condition (enrichment : 1.2 w/o U-235)

Table 5. The Maximum Internal Pressures of 1.20 wt% Enrichment Fuel Elements under Partial Overpower Condition with Burnup of up to 35,000 MWd/MTU

ELEMENT	CASES*	Relative element internal pressure w.r.t. coolant pressure	Burnup to be exceeded element internal pressure than coolant pressure
37-element (4th ring)	CASE 1	1.611	14,000 MWd/MTU
	CASE 2	1.790	14,853 MWd/MTU
CANDU-KF39 (3rd ring)	CASE 1	0.857	
	CASE 2	0.976	
CANDU-KF40 (3rd ring)	CASE 1	0.996	
	CASE 2	1.161	31,250 MWd/MTU
CANDU-KF43 (2nd ring)	CASE 1	1.115	13,000 MWd/MTU
	CASE 2	1.136	31,250 MWd/MTU

*NOTE : CASE 1 : 112.5% partial overpower condition included 10% burnup range around the peak linear element power.

CASE 2 : 112.5% partial overpower condition included 10% burnup range in near the end-of-life time at 35,000 MWd/MTU

Table 6. Component Cost and Other Assumptions for the Fuel Cycle Cost Evaluations of CANDU Advanced Fuel Bundles[2]

	US\$/kg		
• Natural U_3O_8 , \$/kg/U			76.9
• Conversion, U_3O_8 to UF_6			7.7
• Enrichment, \$/kg SWU			135.0
• Fabrication of 37-element bundle (including conversion to UO_2)			
-Natural uranium			46.2
-SEU			61.5
• Back-end cost			
-Enrichment(w/o U-235 in U)	0.71	0.9	1.2
-Burnup(MWd/MTU)	7.3	13.9	21.6
-Back-end cost(US \$/kg)	46.2	49.2	50.8

Table 7. Minimum and Maximum Estimates of CANDU Advanced Fuel Fabrication Costs

	KAERI/AECL 37-element Bundle	KAERI CANDU-KF39 Bundle	KAERI CANDU-KF40 Bundle	KAERI CANDU-KF43 Bundle
MINIMUM ESTIMATE*				
• For NU Fuel				
-US \$/kg U	46.20	46.70 ^b	46.81 ^b	47.33 ^a
-US \$/bundle	872.30	889.40 ^b	895.56 ^b	872.30 ^a
• For SEU Fuel				
-US \$/kg U	61.50	62.16 ^b	62.32* ^b	63.00 ^a
-US \$/bundle	1161.18	1183.91 ^b	1192.25 ^b	1161.18 ^a
MAXIMUM ESTIMATE**				
• For NU Fuel				
-US \$/kg U	46.20	48.18 ^c	49.95 ^c	55.00 ^c
-US \$/bundle	872.30	919.45 ^c	955.57 ^c	1013.75 ^c
•				
-US \$/kg U	61.50	64.14 ^c	66.49 ^c	73.21 ^c
-US \$/bundle	1161.18	1223.95 ^c	1272.02 ^c	1349.48 ^c

*Based on the uranium weight in the fuel bundle :

a=The cost of CANDU-KF43 fuel bundle is assumed to be equal to that of the current 37-element bundle.

b= $A \times [\text{CANDU-KF39 or -KF40 Fuel Volume} / \text{37-element Fuel Volume}]$ where A=the cost of the current 37-element fuel bundle

**Based on the number of elements in the fuel bundle :

c= $A \times [\text{No. of elements in CANDU-KF bundle} / 37]$

where A=the cost of the current 37-element fuel bundle

Table 8. Relative Values of Annual Fuel Cycle Cost Savings of CANDU Advanced Fuel Bundles and Others with Respect to the NU 37-Element Bundle

	KAERI CANDU-KF39 Bundle	KAERI CANDU-KF40 Bundle	KAERI CANDU-KF43 Bundle
○0.711 wt% NU FUEL			
• Annual Fuel Cost Saving			
a. For 0% burnup increase			
–Minimum fabrication (1000 US \$)	1.03% (122)	1.36% (161)	–0.57% (67)
–Maximum fabrication (1000 US \$)	–0.09% (–10.6)	–1.00% (–118)	–6.41% (–760)
b. For 1% burnup increase			
–Minimum fabrication (1000 US \$)	2.01% (238)	2.34% (277)	0.43% (51)
–Maximum fabrication (1000 US \$)	0.91% (107)	0.006% (0.68)	–5.36% (–635)
c. For 2% burnup increase			
–Minimum fabrication (1000 US \$)	3.03% (351)	3.30% (502)	1.40% (166)
–Maximum fabrication (1000 US \$)	1.87% (222)	0.99% (117)	–4.33% (–513)
• Annual Fuel Cycle Cost Saving			
a. For 0% burnup increase			
–Minimum fabrication (1000 US \$)	1.12% (180)	1.48% (238)	–0.34% (–55)
–Maximum fabrication (1000 US \$)	0.30% (48)	–0.26% (–42)	–4.66% (748)
b. For 1% burnup increase			
–Minimum fabrication (1000 US \$)	2.10% (337)	2.46% (394)	0.65% (104)
–Maximum fabrication (1000 US \$)	1.29% (206)	0.73% (118)	–3.63% (–582)
c. For 2% burnup increase			
–Minimum fabrication (1000 US \$)	3.06% (491)	3.41% (547)	1.62% (260)
–Maximum fabrication (1000 US \$)	2.25% (361)	1.71% (274)	–2.61% (–419)
• Annual Reduction Rate of Spent Fuel			
a. For 1% burnup increase			
–Uranium weight	1.40%	1.82%	0.29%
–Bundles	2.45%	3.11%	–2.13%
b. For 1% burnup increase			
–Uranium weight	2.71%	2.79%	1.28%
–Bundles	3.89%	4.07%	–1.12%
c. For 2% burnup increase			
–Uranium weight	3.34%	3.75%	2.25%
–Bundles	4.36%	5.01%	–0.13%

(Table 8 Continued)

	KAERI CANDU-KF39 Bundle	KAERI CANDU-KF40 Bundle	KAERI CANDU-KF43 Bundle
• Annual Reduction Rate of Fuel Refuelling for 8 bundle shift			
a. For 0% bumup increase	2.45%	3.11%	-2.13%
b. For 1% bumup increase	3.89%	4.07%	-1.12%
c. For 2% bumup increase	4.36%	5.01%	-0.13%
• Annual Improvement Rate of Uranium Utilization			
a. For 0% bumup increase	1.40%	1.82%	0.29%
b. For 1% bumup increase	2.71%	2.79%	1.28%
c. For 2% bumup increase	3.34%	3.75%	2.25%
○0.90 wt% SEU FUEL WITH 0% BURNUP INCREASE			
• Annual Fuel Cost Saving (1000 US \$)*	19.63% (2326)	19.74% (2340)	18.79% (2226)
• Annual Fuel Cycle Cost Saving (1000 US \$)*	26.69% (4279)	26.80% (4298)	26.30% (4218)
• Annual Improvement Rate of Uranium Utilization	31.39%	31.54%	31.23%
• Annual Reduction Rate of Spent Fuel			
-Uranium weight	49.92%	50.03%	49.60%
-Bundles	50.45%	50.69%	48.37%
• Annual Reduction Rate of Fuel Refueling			
-For 4 bundle shift	0.91%	1.37%	-3.26%
○1.20 wt% SEU FUEL WITH 0% BURNUP INCREASE			
• Annual Fuel Cost Saving (1000 US \$)*	24.64% (2919)	25.37% (3006)	24.05% (2850)
• Annual Fuel Cycle Cost Saving (1000 US \$)*	35.52% (5696)	36.08% (5785)	35.04% (5619)
• Annual Improvement Rate of Uranium Utilization	40.08%	40.18%	40.01%
• Annual Reduction Rate of Spent Fuel			
-Uranium weight	69.38%	69.43%	69.22%
-Bundles	69.71%	69.83%	68.47%
• Annual Reduction Rate of Fuel Refuelling			
-For 4 bundle shift	39.41%	39.66%	36.95%
-For 2 bundle shift	-21.18%	-20.67%	-26.11%

*For use of the minimum cost of fuel fabrication.

그 사용후 핵연료의 연간 감소율(1.40% U weight; (2.45%)를 고려하면, 충분히 보상될 것이다. 그러나, CANDU-KF43 핵연료집합체의 연간 핵연료비 2.45% Bundles)과 노심 핵연료 교체의 연간 감소율

는 그 사용후 핵연료집합체의 연간 증가율(2.13%)과 노심 핵연료 교체율의 연간 증가율(2.13%)에 따른 추가적인 경제적 손실이 예상된다.

• 연간 핵연료 주기비

CANDU-KF39 개량 핵연료집합체는 NU 기존 핵연료집합체보다 최소 0.30%(48,000 US \$)에서 최대 1.12%(180,000 US \$)의 연간 핵연료 주기비 절감을 보이고, CANDU-KF43 개량 핵연료집합체는 최소 0.34%(55,000 US \$)에서 최대 4.66%(419,000 US \$)의 연간 핵연료주기비 손실을 보인다.

6.2 CCP 상승효과에 따른 연소도 증가를 고려한 NU 개량 핵연료집합체의 경제성

• 연간 핵연료비

CANDU-KF39 개량 핵연료집합체는, CCP 상승효과를 활용하여 핵연료의 연소도를, 예로서, 1% 증가하도록 원자로를 운전하는 경우, NU 기존 핵연료집합체보다 최소 0.91%(107,000 US \$)에서 최대 2.01%(238,000 US \$)의 연간 핵연료비 절감을 보인다. CANDU-KF43 개량 핵연료집합체의 연간 핵연료비는, 핵연료의 연소도를, 예로서, 2% 증가하도록 원자로를 운전할 경우, 최대 1.40%(166,000 US \$)의 절감에서 최소 4.33%(513,000 US \$)의 손실까지 예측된다.

• 연간 핵연료주기비

CANDU-KF39 핵연료집합체는, 핵연료의 연소도를, 예로서, 1% 증가하도록 원자로를 운전할 경우, NU 기존 핵연료집합체보다 최소 1.29%(206,000 US \$)에서 최대 2.10%(337,000 US \$)의 연간 핵연료주기비 절감을 보이고, CANDU-KF43 핵연료집합체는 핵연료의 연소도를, 예로서, 2% 증가하도록 원자로를 운전할 경우, 최대 1.62%(260,000 US \$)의 연간 핵연료주기비 절감에서 최소 2.61%(419,000 US \$)의 연간 핵연료주기비 손실을 보인다.

6.3 CCP 상승효과에 따른 연소도 증가를 무시한 SEU 개량 핵연료집합체의 경제성

0.90 wt% SEU 및 1.2 wt% SEU의 CANDU-KF39 개량 핵연료집합체 연간 핵연료비는 NU 기존 핵연료집합체의 것보다 각각 19.63%(2,326,000 US \$) 및 24.64%(2,919,000 US \$)까지 절감될 수 있고, 그들의 연간 핵연료주기비는 NU 기존

핵연료집합체의 것보다 각각 26.69%(4,279,000 US \$) 및 35.52%(5,696,000 US \$)까지 절감될 수 있다.

0.90 wt% SEU 및 1.2 wt% SEU의 CANDU-KF43 개량 핵연료집합체 연간 핵연료비는 NU 기존 핵연료집합체의 것보다 각각 18.79%(2,226,000 US \$) 및 24.05%(2,850,000 US \$)까지 절감될 수 있고, 그들의 연간 핵연료주기비는 각각 26.30%(4,218,000 US \$) 및 35.04%(5,619,000 US \$)까지 절감될 수 있다.

6.4 노심 핵연료의 연간 교체율 및 사용후 핵연료의 중감효과

CANDU-KF39 개량 핵연료집합체는, 표 8에 나타난 바와 같이, NU 기존 핵연료집합체와 비교하여, 연간 그 사용후 핵연료 무게 및 집합체수와 노심 핵연료 교체율이 다 같이 다소 감소하여, 이에 따른 추가적인 경제적인 이득이 예상되지만, CANDU-KF43 개량 핵연료집합체는 연간 그 사용후 핵연료 집합체수와 노심 핵연료 교체율이 다 같이 다소 증가하여, 이에 따른 추가적인 경제적인 손실이 예상된다.

7. 결론

CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43의 이원봉 개량 핵연료집합체들의 단위 길이당의 핵연료 대 피복관의 체적비는 기존 핵연료집합체의 것보다 15% 정도 증가된 것이다. CANDU-KF39 외환 핵연료봉의 공칭 외경과 피복관 두께는 CANDU-KF40 및 -KF43 외환 핵연료봉들의 것보다 각각 4.9% 및 7.7% 크다. 따라서 CANDU-KF39 개량 핵연료집합체의 가공성과 기존 원자로 핵연료 장전계통과의 양립성은 CANDU-KF40 및 -KF43 개량 핵연료집합체들의 것보다 우수하다고 판단된다.

CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 개량 핵연료봉들의 최대 선출력은 기존 핵연료봉의 것보다 각각 평균 14.1%, 10.5% 및 15.1% 낮다. 한가지 주목할 사항은 “본 최대 선출력이 나타난 CANDU-KF43 내환 핵연료봉의 선출력이 약 8,000 MWd/MTU 연소 시점부터 최대 선출력이 나타난 CANDU-KF39 중간환 핵연료봉의 것보다 높아 진다”는 것이다. CANDU-KF39 및 -KF40 핵연료집합체들의 우라늄

단위 무게당 혹은 단위 집합체당 모든 노심평균 방출 연소도는 기존 핵연료집합체의 것보다 증가된다. 한편, CANDU-KF43 핵연료집합체는 기존 핵연료집합체와 비교하여 그 우라늄 단위 무게당 노심평균 방출 연소도 증가를 보이고, 그 단위 집합체당 노심평균 방출연소도 감소를 보인다. 이러한 출력이력에 따른 NU 혹은 SEU 핵연료 사용시의 모든 경우, 모든 개량 핵연료봉들의 성능은 기존 핵연료봉의 것보다 우수하며, 기존 핵연료집합체의 가동조건과 동일한 부분 과출력 조건에서는 오로지 CANDU-KF39 핵연료봉 내압만이 월성로의 1차 냉각재 압력보다 낮다. 본 개량 핵연료봉들중에 있어서 NU 핵연료 경우에는 CANDU-KF43 핵연료봉은 가장 우수한 열적거동을 보이나, SEU 핵연료 경우에는 CANDU-KF39 핵연료봉이 가장 우수한 열적거동을 보인다. 따라서, NU 및 SEU 핵연료봉의 출력이력과 성능 및 건전성 측면에서 CANDU-KF39 개량 핵연료집합체가 CANDU-KF40 및 -KF43 개량 핵연료집합체들보다 다소 우수한 것으로 판단된다.

본 CANDU-KF39, -KF40 및 -KF43 핵연료집합체들은 기존 핵연료집합체와 비교하여 각각 5.07%, 5.51% 및 7.54%의 CCP 향상을 보이고, 또한 각각 1.105%, 0.837% 및 5.392%의 유동면적 차이를 보인다. 따라서, CCP 상승효과 측면에서 CANDU-KF43 핵연료집합체가 제일 우수하고, 월성로와의 수력학적 양립성 측면에서 CANDU-KF39 핵연료집합체가 제일 우수하다고 판단된다. 본 개량 핵연료집합체들은 월성로 기준으로 0.711 wt%, 0.90 wt% 및 1.20 wt%의 핵연료 농축도에 따라 각각 8-, 4-, 및 2- bundle shift의 핵연료 교체가 가능한 것으로 예측된다.

본 개량 핵연료집합체들의 경제성을 상호 비교하면, 결과적으로 CANDU-KF39 핵연료 집합체가 CANDU-KF40 혹은 -KF43 개량 핵연료집합체보다 우수하다고 판단된다. 또한 CANDU-KF39 핵연료 집합체는, 기존 핵연료집합체와 비교하여, 본 경제성 분석에서 고려되지 않았던 사용후 핵연료의 연간 무게 및 집합체 수와 노심 핵연료의 연간 교체율의 감소로 인하여 추가적인 경제적 이득을 줄 수 있지만, 특히 CANDU-KF43 개량 핵연료집합체는 기존 핵연료집과 비교하여 연간 사용후 핵연료집합체 수와 노심 핵연료의 연간 교체율의 증가로 인하여 추가

적인 경제적 손실이 예상된다.

개량 핵연료 집합체 최적방안은 궁극적으로 그 핵연료가 장전될 원자로 및 핵연료 자체의 “안전성”, “기술성” 및 “경제성”이 최적이어야 한다. 여기서 언급한 기술성은 주로 핵연료집합체의 가공, 시험 및 노심 핵연료관리 등의 기술과 연계되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 관점의 국내 여건상, 본 개량 핵연료집합체들의 상호 기술성 우열은 다 같이 거의 동일하다고 판단되며, 또한 상기한 안전성 및 경제성의 것보다 큰 비중이 없다고 판단된다. 따라서 본 개량 핵연료집합체들은 안전성 및 경제성 측면에서 상호 비교하면 다음과 같다.

현재 월성로용 NU 기존 핵연료집합체는 그 원자로 및 핵연료 자체와 관련된 제반 안전 여유도가 충분하다. 따라서, NU 개량 핵연료집합체는 현 NU 기존 핵연료집합체와 관련된 제반 안전성과 같거나 혹은 그 이상인 범위내에서 경제성이 우수하여야 하며, SEU 개량 핵연료집합체는 현 NU 기존 핵연료집합체와 관련된 제반 안전성 및 경제성과 같거나 혹은 그 이상인 범위내에서 안전성 및 경제성이 우수하여야 할 것이다. 이러한 관점에서 상기한 핵연료집합체의 구조 및 제원, 핵적 특성, 핵연료봉의 성능 및 건전성, 열·수력학적 특성, 핵연료 노심관리, 경제성 등을 종합 분석하면 본 CANDU-KF39 개량 핵연료집합체가 CANDU-KF40 혹은 -KF43 개량 핵연료집합체보다 우수하다고 판단된다. 즉, CANDU-KF39 핵연료집합체는, NU 핵연료 경우, CANDU-KF40 혹은 -KF43 핵연료집합체보다 경제성이 우수하고, SEU 핵연료 경우, CANDU-KF40 혹은 -KF43 핵연료집합체보다 안전성이 우수하며, NU 및 SEU 모든 핵연료 경우, 기존 핵연료집합체의 안전성 및 경제성보다 우수하다.

참고문헌

- [1] 석호천 외, “고연소도 핵연료 기술 개발”, KAERI/RR-571/86(1987.5.); KAERI/RR-801/88(1989.5), 연구기관: 한국에너지연구소; 발행기관: 과학기술처, 1989. 5.
- [2] R.E. GREEN, P.G. BOCZAR, and I.J. HASTINGS, “Advanced Fuel Cycles for CANDU Reactors”, AECL-9755, Presented

- at the 28th Annual Conference of the CNA, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1988 June 12-15.
- [3] E.S.Y. TIN et al., "CANDU 600 Generating Station Physics Design Manual", AECL Report, 1980.
 - [4] I.E. OLDAKER, "Wolsung-1 Nuclear Power Plant Fuel Design Manual", AECL Report, DM-59-37000, 1981.5.21.
 - [5] M.J. HALSALL, "A Summary of WIMSD4 Input Options" AEEW-M 1327, 1975
 - [6] H.C. SUK, W. HWANG and K-S. SIM, "KAFEP: A Computer Code for CANDU Fuel Performance Analysis under Reactor Normal Operating Condition", J. Korean Nuclear Society 19[3], 180-185(1987)
 - [7] 석호천 외, "KATHA 전산코드 기술 및 사용 지침서" KAERI Report, KAERI/W3/PM-1004-0, 1984.
 - [8] P.G. BOCZAR, et. al., "Slightly Enriched Uranium in CANDU: An Economic First Step towards Advanced Fuel Cycles", Proceedings of an International Conference on Nuclear Power Performance and Safety Organized by the IAEA, and Held in Vienna, 28 September -2 October 1987.