

<연구논문>

고리1호기 가동이력을 고려한 손상 배플포머볼트 방사화 계산

맹영재[†] · 이현철* · 이명호* · 황성식** · 오승진*** · 장윤석****

Radioactivity Calculation Considering Kori Unit 1 Operation History for the Defected Baffle Former Bolts

Young Jae Maeng[†], Hyun Chul Lee*, Myeong Ho Lee*, Seong Sik Hwang**,
Seung Jin Oh***, and Yun Suk Jang****

(Received 25 May 2023, Revised 14 June 2023, Accepted 19 June 2023)

ABSTRACT

The defected baffle former bolts of Kori unit 1 were withdrawn to analyze the cause of damage and gamma-ray measurement is being scheduled. Prior to that, in order to calculate the specific radioactivity value of the baffle former bolt, a radioactivity calculation method considering the actual operation history of the nuclear power plant is introduced and the calculation results are shown. In particular, the radioactivity calculation method considering the operation history is obtained by defining the monthly contribution factor from the actual monthly operation history. As a result, the results considering operation history are 16-28% lower than the general radioactivity calculation results. These results can contribute to establish a reasonable but economical strategy when planning nuclear power plant decommissioning.

Key Words : Activity calculation(방사화계산), Transport calculation(수송계산), Baffle former bolt(배플포머볼트), Operation history(가동이력), Reactor Internals(원자로내부구조물), Decommissioning(해체)

1. 서 론

고리1호기는 열출력 1724 MWth의 웨스팅하우스 사 설계한 2-loop 형태의 가압경수로 원전이며, 40년의 상업운전을 마치고 원전해체가 결정(2017년 6월)되었다. 고리1호기는 원자로 최초 임계 후 수명 종료 기간 동안 제32차 핵연료 주기까지와 제34차 계획예방정비까지 수행되었다. 그 중 제30차 핵연료 주기 종료 후 시작된 제32차 계획예방정비 기간에 고리1호기 원자로 내부구조물(Reactor Internals) 비파괴 검

사에서 Type 316 Stainless steel 재질의 배플포머볼트(BFB, Baffle Former Bolt)로부터 균열성 결함 신호가 발견되었다.

배플포머볼트에 균열이 발생하였는지 여부와 균열 원인을 규명하기 위해서 실제 고리1호기의 손상 배플포머볼트 2개와 정상 배플포머볼트 2개를 인출하였다.⁽¹⁾ 인출된 볼트는 한국원자력연구원 내 핫셀(Hot cell)으로 이송하였으며 균열원인 분석을 위해 다양한 기계, 재료 시험편들을 제작 및 분석하는 중이다. 또한 인출된 고리1호기 배플포머볼트의 분석이 끝난 시험편 및 잔여물들은 방사성폐기물로서 해체원전의 방사성폐기물 분류 및 처분 방법과 절차를 재정비할 수 있는 매우 중요한 역할을 제공할 수 있다.

[†] 책임저자, 회원, 한국원자로감시기술(주)
E-mail : maeng@krist.co.kr
TEL : (042)862-8088, FAX : (042)934-2115

* 한국원자로감시기술(주)

** 한국원자력연구원

*** 한국수력원자력(주)

**** 경희대학교

고리1호기는 40년의 수명 기간동안 유효전출력년수(EFPY, Effective Full Power Year) 30.05 EFPY를 기록함으로써 해당원전의 이용률은 대략 75%이다. 또한 40년이라는 수명 기간은 방사화 계산관점에서 상당히 긴 시간에 속할 수 있으며, 그 기간 동안 32번의 핵연료 주기와 34번의 계획예방정비를 거치면서 다양하고 복잡한 가동이력을 보유하고 있다. 그림 1은 고리1호기의 40년 수명기간동안에 해당하는 각 월별 상대 열출력을 나타내고 있다.

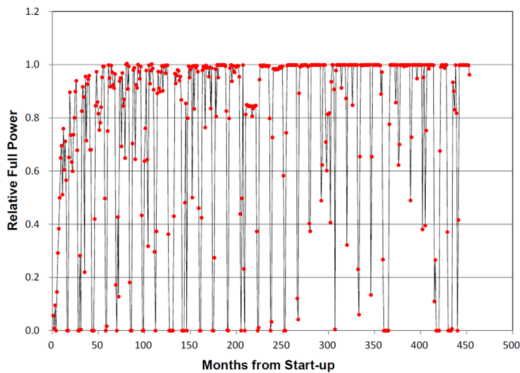


Fig. 1 Monthly relative thermal power history of Kori nuclear power plant unit 1.

본 논문에서는 고리1호기 배플포머볼트의 방사능 준위를 파악하기 위해 각 핵연료 주기별 중성자 수송계산을 수행하고, 40년 수명기간 동안의 실제 가동이력을 반영하여 방사화 계산을 수행하는 방법을 소개하고 이를 토대로 배플포머볼트 방사능 값을 예측하였다.

2. 방사화 계산 방법론

2.1 일반적 방사화 계산 방법

방사화 계산을 수행하기 위해서 표적(Target) 핵종으로부터 중성자 조사에 의해 생성된 생성(Product) 핵종의 일반적인 방사능 준위 계산 방법은 매우 잘 알려져 있으며, 일정한 반응률 R 로부터 생성되는 핵종의 방사능 값을 A 라 할 때, A 는 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$A = R(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

여기서, A 는 방사능[Bq], R 은 반응률[Reactions/sec], λ 는 붕괴상수[1/sec] 및 t 는 조사기간[sec]이다. 만약

조사기간이 상당히 길 경우에는 식 (1)은 $A = R$ 이 되어 방사능 값 A 는 반응률 R 로 수렴하게 되며 이 때의 방사능 값을 포화(Saturated) 방사능 값이라고 부른다.

반응률 R 은 중성자 에너지에 대한 연속함수로 나타내면 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$R = N_0 \int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE \quad (2)$$

여기서, N_0 는 표적 핵종의 수밀도[atoms/cm³], $\sigma(E)$ 는 에너지별 미시 반응단면적[cm²], $\phi(E)$ 는 에너지면 중성자 속[neutrons/cm²-sec]이다.

식 (2)에서 보는 바와 같이 반응률 R 과 그로부터 구해지는 방사능 값 A 는 중성자 속 $\phi(E)$ 와 직접적으로 연관이 있으며, 마지막으로 관심 핵종의 초기 방사능 값이 A_0 이고 t_i 시간동안 조사되었다가 t_j 시간이 지난 뒤에 나타내지는 방사능 값 A 는 다음 식 (3)으로 표현된다.

$$A = A_0 e^{-\lambda t_j} + R(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (3)$$

위의 식 (3)이 일반적으로 사용되고 있는 방사화 계산식이며, 여기서 식 (2)에서 소개한 표적 핵종의 수밀도, N_0 값을 단위 질량(gram) 당 원자의 개수로 정하면 최종 방사능 값 A 의 단위는 Bq/g이 되어 비방사능(Specific Activity) 값이 도출되며 본 논문에서 제시하는 방사화 계산값은 비 방사능 값을 기준으로 계산하였다.

2.1.1 배플포머볼트 관심반응의 방사화학적 성질

식 (3)으로부터 배플포머볼트 방사능 준위를 구하기 위하여 관심 반응과 해당 핵반응에 대한 방사화학적 인자를 Table 1에 제시하였다.

SS-316 재료로 구성된 배플포머볼트의 관심 핵반응은 지배적 원소인 철(Fe)과 불순물로 포함된 코발트(Co)에 의한 핵반응을 선정하였으며, 표적 핵종의 수밀도를 구하기 위한 성분비는 각각 ASTM A240 및 NUREG CR/3474에 제시된 성분비를 참고하였다.

또한, 관심 핵반응들의 에너지별 미시 반응단면적, $\sigma(E)$ 는 RSICC DLC-185에 제시된 미시반응단면적 자료집을 참고하였다.⁽⁸⁾ 그림 2는 중성자 에너지별 미시 반응단면적을 나타낸 것이며, 해당 자료집은 중성자 에너지를 47 그룹으로 세분화하여 그룹별 미시 반응단면적을 제공한다.

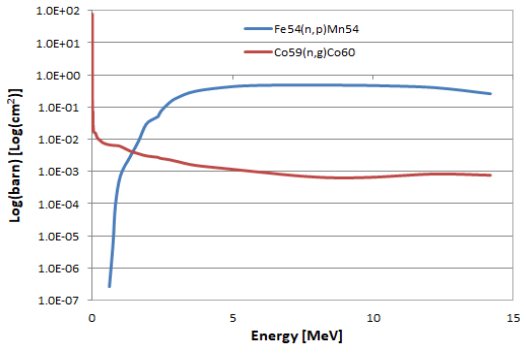
Table 1 Radiochemical characteristics of interested reactions

Iron (Fe)	
- Reaction of Interest	: Fe-54(n,p)Mn-54
- 90% Neutron Energy Response ^{a)}	: 2.27–7.54 MeV
- Target Atom Fraction	: 0.0585
- Target Atomic Mass	: 55.845 g/mol
- Target Atom Composition	: 65.5w% ^{b)}
- Product Half-Life	: 312.1 day
- Reference	: (3)
Cobalt (Co)	
- Reaction of Interest	: Co-59(n,γ)Co-60
- 90% Neutron Energy Response ^{a)}	: Thermal
- Target Atom Fraction	: 1.0000
- Target Atomic Mass	: 58.933 g/mol
- Target Atom Composition	: 1470 ppm ^{c)}
- Product Half-Life	: 1925.5 day
- Reference	: (4)

^{a)}Energy response was derived using the ENDF/B-VI ²³⁵U fission spectrum Ref. (5)

^{b)}Standard composition of SS-316 from ASTM A240 (Ref. (6))

^{c)}Average value of Co from NUREG CR/3474 Table 4-9 (Ref. (7))

**Fig. 2** Microscopic cross-section of interested reactions.

2.2 가동이력을 고려한 방사화 계산 방법

가동이력을 고려한 방사화 계산 방법은 해당 원전의 주기별 가동이력을 월별로 나누어 시간 단위를 세분화하는 작업과 식 (2)에서 제시한 반응률 R 을 월별 단위에 맞게 기여도를 조정하는 작업이 필요하다. 이를 위해 연속함수의 적분형태로 기술된 식 (2)를 합산(Summation)형태로 근사하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_i = N_0 \sum_{j=1}^n \sigma_j \phi_j^i \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

어떠한 한 기간 i 에 대하여, 중성자 에너지 그룹을 1부터 n 개까지 나누었을 때, 에너지 그룹 j 번째의 미시 단면적 σ_j 와 중성자 속 ϕ_j 를 이용하여 기간 i 동안의 반응률 R_i 를 얻을 수 있다.

위의 식 (4)로부터 기간 i 를 월별 단위로 정의할 경우에 주기별 정격 열출력에 맞춰 계산된 중성자 속을 보정하는 작업이 필요하다. 왜냐하면 방사능 값은 중성자 속 ϕ 과 비례하여 증가하지만 그림 1과 같이 해당 기간의 열출력이 정격 열출력보다 낮은 열출력으로 발전된 기간이 존재하기 때문이다. 따라서 이러한 보정인자를 P_i 라 정의하고 이를 고려한 중성자 속 ϕ_j^i 을 다시 쓰면 다음 식 (5)와 같다.

$$\phi_j^i = P_i \phi_j^{full} \quad (5)$$

여기서, P_i 는 해당 주기 전출력에 대한 i 번째 월의 상대 열출력 비율로 정의하며 ϕ_j^{full} 은 해당 주기 전출력에 대한 j 번째 중성자 스펙트럼으로 정의할 수 있다.

월별 상대 열출력 비율 인자 P_i 를 적용함으로써 일반적으로 사용하던 방사화 계산 식 (3)에서 고려하지 못했던 해체원전의 길고 복잡한 가동이력을 고려할 수 있음과 동시에 주기별 또는 위치별로 달라지는 중성자 속도 고려할 수 있게 된다. 또한 전출력과 실제 출력 비율을 통해 전출력에 비해 상대적으로 낮은 출력으로 가동했던 기간을 고려할 수 있고 비상정지 또는 계획예방정지와 같이 출력이 없는 기간에는 감쇄하는 과정까지 고려가 가능하다.

최종적으로 식 (4)의 적분항을 합산 형태로 근사하고 식 (5)의 월별 기여도 인자를 고려한 방사화 계산을 수행하기 위해 두 식을 식 (3)에 대입하면 i 번째 달에 생성되는 방사능 A_i 는 다음의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$A_i = A_{i-1} e^{-\lambda t_i} + N_0 \sum_j \sigma_j P_i \phi_j^{full} (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (i = month, j = energy) \quad (6)$$

위 식 (6)을 통해 원자력발전소의 가동을 시작하는 달부터 영구정지하기까지의 월별 출력을 적용하여 가동이력을 고려한 방사화 계산을 수행할 수 있으며, 마지막 달의 방사능 값이 최종 방사능 값이 된다.

마찬가지로 가동이력을 고려한 방사화 계산의 관

심반응과 방사화학 특성은 본 논문 2.1.1 Table 1에서 제시한 내용과 같으며, 특히 표적 핵종의 수밀도는 단위 질량당 원자의 개수로 정의하여 단위를 Bq/g으로 하는 비 방사능 값으로 계산하였다.

2.2.1 중성자 수송계산

방사화 계산을 수행함에 있어 표적 핵종의 반응을 결정하는 중성자 속을 정확히 평가하는 것은 가장 핵심적인 출발점이다. 따라서 중성자 수송계산은 실제 가동 핵연료 주기 동안의 조사이력이 기준이 된다. 이미 운전이 종료된 핵주기의 경우는 핵설계 보고서(NDR, Nuclear Power Report)로부터 노심의 반경 방향 및 축 방향 출력분포가 결정되어있으며, 또한 실제 발전소 가동이력으로부터 전출력 운전일 수까지 정확하게 계산할 수 있다. 그러나 주기별, 관심위치별 중성자 속은 노심 출력분포, 핵연료 농축도 및 사양, 가동이력 및 핵연료 장전모형 등의 노심 운용전략의 변화에 따라 계속적으로 달라진다. 따라서 주기별 수송계산을 직접 수행하여 수송계산 모델 전체에 걸친 중성자 조사량 및 에너지 스펙트럼이 필수적이다.

가동이력을 고려한 방사화 계산에서 식 (5)의 주기별 전출력에 해당하는 중성자 속, ϕ_j^{full} 을 구하기 위해 3차원 불연속 각분할법(Discrete ordinates method)을 적용한 코드인 RAPTOR-M3G(Rapid Parallel Transport Of Radiation-Multiple 3dimensional Geometries) 수송계산 코드를 사용하였다.⁽⁹⁾ RAPTOR-M3G는 미국 웨스팅하우스사로부터 개발되어 USNRC(United State Nuclear Regulatory Committee)의 승인을 받았으며, 병렬처리기술을 탑재한 3차원 결정론적(Deterministic) 수송계산 코드이다.⁽¹⁰⁾

RAPTOR-M3G는 선형 볼츠만(Boltzmann) 수송 방정식을 불연속 각분할 방법을 이용하여 풀이하며, 이를 각 핵주기별, 위치별 radial(R)-azimuthal(θ)-axial(Z) 모든 위치에서의 중성자 속 분포를 해석한다. 본 논문에서 적용한 RAPTOR-M3G 해석은 비등방 산란의 경우 산란 단면적은 P₃ 전개까지, 각분할은 S₈ 구적(quadrature)까지 사용하였으며, 내/외부 반복계산의 수렴한계는 0.001로 설정하여 해석을 수행하였다.

그림 3, 그림 4, 및 그림 5는 3차원 중성자 수송해석에 사용된 수송계산 모델을 나타내고 있으며, 노심 대칭성을 이용하여 1/8(Octant) 노심을 모사하였

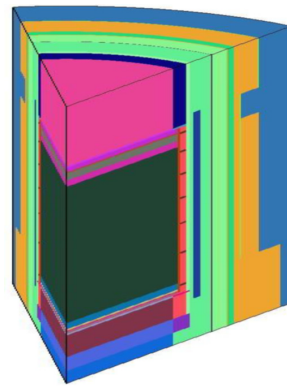


Fig. 3 Three dimensional transport calculation model of Kori Unit 1.

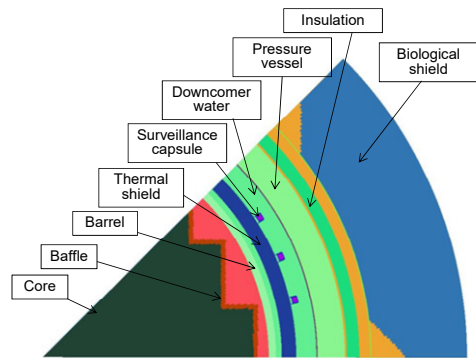


Fig. 4 Mid-plane view of the transport calculation model.

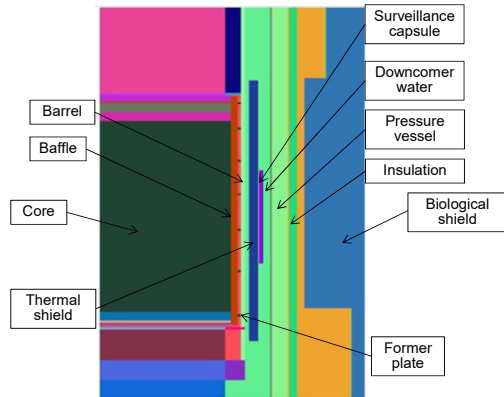


Fig. 5 Axial-plane view of the transport calculation model.

다. 수송계산 모델에는 원자로 노심, 내부 구조물, 압력용기 및 생물학적 차폐체 등에 대한 기하학적 구조를 설계 수치 및 제작 수치를 기반으로 상세히 모

사하였다.

그림 3에서 R, θ , Z 노심 모형의 격자구조는 R방향으로 188개, θ 방향으로 106개, Z방향으로 210개의 간격을 사용하였고 36개의 서로 다른 구역으로 구분하였으며, 노심 중앙으로부터 R방향은 260 cm까지, Z방향은 -315 cm ~ 359 cm까지를 포함하고 있다. 특히, 노심 외곽의 배플(Baffle) 영역에 대한 모델링은 상대적으로 더욱 세분화된 격자 간격을 사용하여 직각형태의 구조물들을 원통좌표계로 표현함에 있어 차폐효과의 정확성을 위해 두께와 부피가 보존될 수 있도록 모델링 하였다.

앞서 소개한 3차원 수송계산 모델을 통해 제1핵주기부터 제32핵주기까지 수송계산을 수행하였으며, 수송계산 모델 내 모든 위치에서의 중성자 속을 구할 수 있다. 관심 부위인 손상 배플포머볼트 위치는 포머플레이트 1단의 45도 위치이므로 해당 위치에 대한 각 주기별 중성자 스펙트럼은 그림 6과 같다. 해당 스펙트럼은 방사화 계산의 반응률을 결정하기 위한 해당 주기 전출력에 해당하는 중성자 속을 생산할 수 있으며, 이를 미시 반응단면적과 결합하여 반응률을 결정할 수 있다.

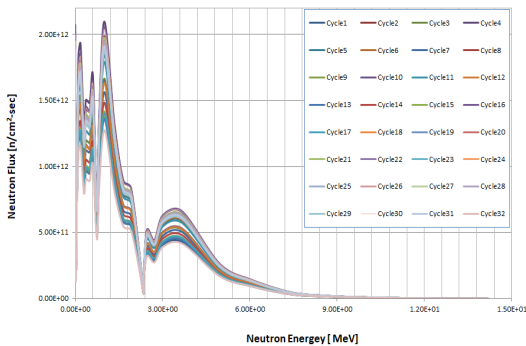


Fig. 6 Cycle-specific neutron spectrum on the baffle former bolt.

3. 배플포머볼트 방사화 계산 결과

3.1 배플포머볼트 비 방사능 결과

본 3장에서는 앞서 설명하였던 일반적 방사능 계산 방법과 가동이력을 고려한 계산 방법 그리고 방사화 계산에 필요한 방사화학적 인자와 수송계산 결과를 종합하여 배플포머볼트의 비 방사능 값을 도출한다. 일반적 방사화 계산에서는 40년의 조사와 5년

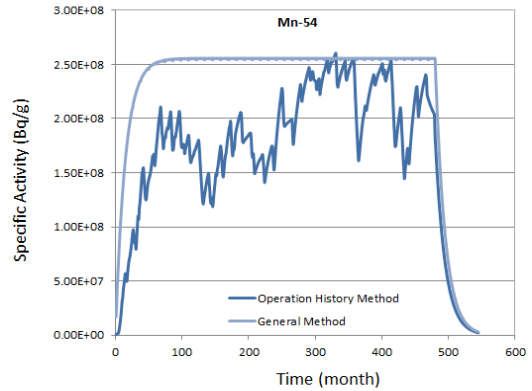


Fig. 7 Mn-54 specific activity of the baffle former bolt using general method and operation history method.

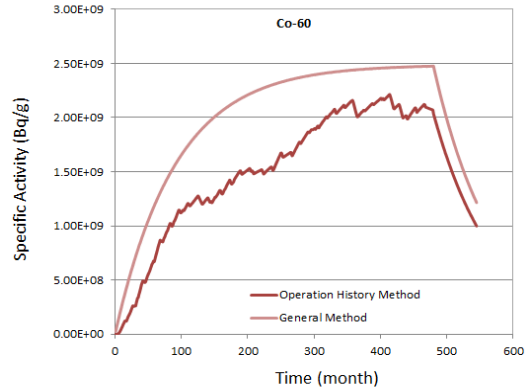


Fig. 8 Co-60 specific activity of the baffle former bolt using general method and operation history method.

의 감쇄기간을 고려하였고, 가동이력을 고려한 방사화 계산에서는 40년 동안 이용률 75%로 가동되었던 이력을 월별로 고려하고 마찬가지로 5년의 감쇄기간을 적용하여 계산하였다.

배플포머볼트에 대한 관심 핵반응들의 일반적 방사화 계산 결과(General Method)와 가동이력을 고려한 계산 결과(Operation History Method)는 그림 7 (Mn-54) 및 그림 8(Co-60)에 제시하였다.

3.1.1 배플포머볼트 일반적 방사화 계산 결과

일반적 방사화 계산은 고리1호기 제30차 핵주기를 기준으로 40년 동안 쉬지 않고 운전하였으며, 5년의 감쇄기간을 겪은 결과를 나타내고 있다.

일반적 방사화 계산 방법을 적용한 배플포머볼트 방사화 계산 결과는 그림 7(Mn-54) 및 그림 8(Co-60)의 General Method에서 확인할 수 있으며, Fe-54(n,p)Mn-54 반응과 Co-59(n,γ)Co-60 반응으로부터 생성된 핵종의 40년 수명종료 시 비 방사능 값은 각각 2.56E+08 Bq/g 및 2.48E+09 Bq/g으로 평가되었으며, 5년이 지난 기준으로 각각 3.18E+06 Bq/g 및 1.22E+09 Bq/g으로 평가되었다.

3.1.2 배플포머볼트 가동이력을 고려한 방사화 계산 결과

배플포머볼트에 대한 관심 핵반응들의 더욱 실제와 같은 방사화 계산 결과를 얻기 위하여 원전 가동이력을 월별로 나누고 이에 필요한 월별 기여도 보정인자를 고려한 방사화 계산 결과는 그림 7(Mn-54) 및 그림 8(Co-60)의 Operation History Method로 나타난다.

가동이력을 고려한 방사화 계산 방법을 적용하여 배플포머볼트의 Fe-54(n,p)Mn-54 반응과 Co-59(n,γ)Co-60 반응으로부터 생성된 핵종의 40년 수명종료 시 비 방사능 값은 각각 2.03E+08 Bq/g 및 2.07E+09 Bq/g으로 평가되었으며, 5년이 지난 기준으로 각각 2.28E+06 Bq/g 및 9.99E+08 Bq/g으로 평가되었다. 해당 계산 결과는 핵주기별 핵연료 장전모형에 따른 주기별 중성자 속의 변화와 방사능 값 감소에 영향을 주는 계획예방정비 및 비상정지 등과 같은 가동이력이 모두 고려된 결과이다.

각 방법의 차이는 일반적 방사화 계산 결과를 기준으로 가동이력을 고려한 방사화 계산 결과가 40년의 조사종료 시점에서 Mn-54는 -20%, Co-60은 -16% 정도의 차이가 발생하였으며, 5년의 감쇄 후 시점에서 Mn-54는 -28%, Co-60은 -18% 정도의 차이가 발생하였다. 위에서 설명한 일반적 방사화 계산 결과와 가동이력을 고려한 방사화 계산결과 비교는 Table 2에 정리하였다.

손상 배플포머볼트 위치에서 방사화 계산 결과, 모든 경우에서 일반적 방사화 계산 결과가 가동이력을 고려한 방사화 계산 결과보다 높은 값을 나타내었다.

추후 이 계산 값들은 손상 배플포머볼트를 직접 감마선 측정기를 통해 측정된 비 방사능 측정 결과와 비교 및 조정을 수행할 예정이며, 정확하고 신뢰성있는 계산 결과를 토대로 합리적이며, 경제적인

Table 2 Comparisons specific activity results according to activity calculation methods

After 40 years irradiation			
	General Method[Bq/g]	Operation History Method[Bq/g]	Difference*
Mn-54	2.56E+08	2.03E+08	-20%
Co-60	2.48E+09	2.07E+09	-16%
and After 5 years decay			
	General Method[Bq/g]	Operation History Method[Bq/g]	Difference*
Mn-54	3.18E+06	2.28E+06	-28%
Co-60	1.22E+09	9.99E+08	-18%

*Difference = (Operation - General)/(General) x 100(%)

해체원전 방사성폐기물 분류 및 처분 전략 수립에 기여할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 원전의 가동이력을 방사화 계산에 적용하는 방법을 소개하고 가동이력을 고려한 방사화 계산을 통해 고리1호기 손상 배플포머볼트에 대해 비 방사능값을 도출하였다. 그 결과, 가동이력을 고려한 방사화 계산 방법이 일반적 방사화 계산 결과보다 16% ~ 28%까지 낮은 결과를 나타내었다. 이는 월별 출력이력으로부터 얻어진 기여도 보정 인자를 통해 방사화 계산의 과도한 보수성을 제거한 결과로 볼 수 있다. 또한 월별 기여도 보정 인자를 통해 포화방사능 준위를 주기별, 월별로 적용하고 출력이 없던 기간의 감쇄과정까지 고려할 수 있기 때문에 원전해체 시 방사능 준위 분포를 정확하게 파악할 수 있다.

위의 배플포머볼트 비 방사능 계산값들은 추후 손상 배플포머볼트를 감마선 측정장비로부터 구한 비 방사능 측정값과 비교 및 분석할 예정이다. 실제 측정값은 철(Fe)과 코발트(Co)의 함량에 따라 계산값과 다소 차이를 보일 수 있을 것이라 예상되지만 추후 핵종분석 결과를 토대로 계산값을 조정할 수 있다.

가동이력을 고려한 방사화 계산 방법은 해당 원전의 실제 월별 열출력량 자료를 통해 수행할 수 있으며, 모든 가압경수로형 원전에 적용이 가능하기 때

문에 실용범위가 매우 크며, 상대적으로 더욱 정확한 방사화 계산 결과를 제공할 수 있을 것이라 기대된다. 이를 통해 얻어지는 방사능 준위 분포와 공간 선량 분포 등은 해체 준비단계에서 후속 공정에 대한 작업 계획, 방사성폐기물 처분 전략 수립 등에 신뢰성 있는 자료를 제공하여 안전하고 합리적인 원전 해체에 기여할 수 있다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20191510301140, 해체원전 원자로 내부구조물 배플포머볼트 조사유기 응력부식 균열 열화특성 분석기술개발).

참고문헌

- (1) Oh, S. J., Na, K. H., Lee, C. G., and Maeng, Y. J., 2022, "Maintenance for Removing of Defected Baffle Former Bolts in Kori unit 1," *Trans. of the KPVP*, pp. 33-34.
- (2) John R. Lamarsh, 2001, "Introduction to Nuclear Engineering," 3rd ed. Chapter 2.
- (3) ASTM E 263, "Standard Test Method for Measuring Fast-Neutron Reaction Rates by Radioactivation of Iron," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (4) ASTM E 481, "Standard Test Method for Measuring Neutron Fluence Rates by Radioactivation of Cobalt and Silver," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (5) ASTM E 844, "Standard Guide for Sensor Set Design and Irradiation for Reactor Surveillance, E706(IIC)," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (6) ASME A 240, "Standard Specification for Chromium and Chromium-Nichel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (7) Evans, J. C., Lepel, E. L., Sanders, R. W., Wilkerson, C. L., Silker, W., Thomas, C. W., Abel, K. H., and Robertson, D. R., 1984, "Long-Lived Activation Products in Reactor Materials," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, NUREG/CR-3474.
- (8) RSICC Data Library Collection DLC-185, 1996 March, "BUGLE-96, Coupled 47 Neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross section Library Drived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications," Oak Ridge National Laboratory.
- (9) Westinghouse, 2011, "RAPTOR-M3G Version 2.0 User Manual," Westinghouse, Cranberry, Pittsburgh PA, LTR-REA-11-65, Rev. 0.
- (10) Westinghouse, 2018, "Fluence Determination with RAPTOR-M3G and FERRET," Westinghouse Electric Company, Cranberry, Pittsburgh, PA, WCAP-18124-NP-A.