



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2024년 2월
박사학위 논문

원전해체 시 노심 배럴내
방사화부식생성물을 고려한 선량평가
및 최적제염 적용 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

이상헌

원전해체 시 노심 배럴내
방사화부식생성물을 고려한 선량평가
및 최적제염 적용 연구

A Study on the Dose Assessment Applying CRUD
in the Core Support Barrel during Nuclear Power Plant
Decommissioning and Optimal Decontamination Application

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이상현

원전해체 시 노심 배럴내
방사화부식생성물을 고려한 선량평가
및 최적제염 적용 연구

지도교수 송 중 순

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 상 현

이상헌의 박사학위논문을 인준함

위원장	<u>이 경 진 (인)</u>
위 원	<u>송 종 순 (인)</u>
위 원	<u>공 태 영 (인)</u>
위 원	<u>박 병 기 (인)</u>
위 원	<u>조 재 선 (인)</u>

2024 년 1 월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	IX
제1장 서론	1
제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 이론적 배경 및 연구동향	3
제2장 연구방법 및 범위	13
제1절 고려사항 및 연계방안	13
1. 주요 핵종 선정 방법론	13
2. 부식생성물 내 화합물 형태 및 계통 제염방법	18
제2절 크러드 선원항 평가	23
1. 크러드 생성 주요 메커니즘	23
2. 평가도구 및 방법	24
3. 연구범위	26
제3절 방사화선원항 평가	27
1. 중성자 방사화 계산	27
2. 평가도구 및 방법	28
3. 연구범위	29
제4절 선량평가	30
1. 선량평가 정의	30
2. 평가도구 및 방법	32
3. 연구범위	32
제3장 평가대상 및 입력인자	35
제1절 크러드 선원항	35

제2절 원자로 압력용기 방사화	38
제3절 크리드 및 방사화선원향을 고려한 선량평가	40
 제4장 평가결과 및 논의	 41
 제5장 결론	 53
 참고문헌	 56
부록	59

표 목차

표 1. 국내/외 크러드 평가코드별 주요 특징	4
표 2. 국내/외 해체를 위한 방사화재고량 평가방법	6
표 3. 중성자 Flux 및 방사화재고량 계산을 위한 평가코드 주요 특징	7
표 4. 해체 작업자 선량평가 코드 주요 특징	9
표 5. 주요 화학적 제염기술의 특성	12
표 6. 크러드 내 주요 핵종 선정을 위한 기준 핵종	14
표 7. 1 차계통 내 발생원을 고려한 주요 핵종 도출	15
표 8. 250일 이상의 반감기를 갖는 핵종 분류	17
표 9. 감마선 방출 및 생성 메커니즘에 따른 핵종 분류	17
표 10. 1 차계통 주요 구성품의 원소별 특성	19
표 11. 부식생성물의 화합물 도출을 위한 평가환경 구축	21
표 12. 원전에서 발생 가능한 부식생성물 화합물 도출	22
표 13. 제염계수 및 제거율과의 상관관계	33
표 14. 해체 작업자 선량평가 도출을 위한 기기 모델링	34
표 15. CRUDTRAN 구동을 위한 입력인자	35
표 16. 고리 1 호기 주기별 운전기간	38
표 17. ORIGEN2 평가를 위한 주요 입력인자	39
표 18. 제염계수를 고려한 선원항 입력자료	40
표 19. 주요 핵종 방사화 계산결과(주기 종료시점)	45
표 20. 주요 핵종 방사화 계산결과(해체 예상시점)	46
표 21. Co-60 방사화 계산결과(주기 종료시점, 해체 예상시점)	48
표 22. 크러드 및 방사화선원항을 고려한 선량평가 결과(시간)	51
표 23. 크러드 및 방사화선원항을 고려한 선량평가 결과(연간)	52

그림 목차

그림 1. 크리드를 구성하는 주요 성분 및 특성	10
그림 2. 산화/환원 계통제염 단계별 내용	11
그림 3. 크리드 주요 생성 메커니즘	23
그림 4. 고리 1 호기 원자로 압력용기 중성자 Flux	29
그림 5. Core 및 S/G에서의 크리드 생성량 평가결과($\text{mg-Fe}/\text{cm}^2$)	41
그림 6. Core 및 S/G에서의 크리드 선원항 평가결과(Bq/cm^2)	42
그림 7. Co-60 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)	43
그림 8. Fe-55 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)	43
그림 9. Nb-94 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)	44
그림 10. Ni-59 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)	44
그림 11. Ni-63 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)	44
그림 12. 원자로 압력용기에서의 주요 핵종 방사화 계산결과 비교	47
그림 13. 시점에 따른 누적 및 주기별 Co-60 선원항 비교	49
그림 14. 주기 종료시점 및 해체 예상시점에서의 Co-60 방사화 선원항	49
그림 15. 노심지지 배럴 및 원자로 압력용기에서 기인하는 선량 평가결과(시간) ·51	
그림 16. 노심지지 배럴 및 원자로 압력용기에서 기인하는 선량 평가결과(연간) ·52	

ABSTRACT

A Study on the Dose Assessment Applying CRUD in the Core Support Barrel during Nuclear Power Plant Decommissioning and Optimal Decontamination Application

Lee SangHeon

Advisor : Prof. Song Jong Soon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Securing the full-cycle of the development of nuclear technology, including nuclear power plant construction, operation, and decommissioning, as well as radioactive waste management, is essential for the continuous development of nuclear power and is crucial in terms of ensuring continuity. As the source-term information of radioactive materials generated by nuclear power plants must be predicted or analyzed for the entire life cycle, nuclear power plants in South Korea are continuously preparing and revising the Final Safety Analysis Report (FSAR), which serves as the main data input for design. The FSAR covers how to secure radiation source-terms which are major material dependent input factors in shielding design, exposure dose assessment, and system management, and provides information on the source-terms information of Chalk River Unidentified Deposits (CRUD), which are radioactive corrosion products in the reactor coolant system. Radioactive wastes generated in the primary system of nuclear power plants are radioactivated by neutrons during operation, and the importance of managing these materials is very apparent in terms of radioactive waste management. In particular, the management of neutron induced radioactive corrosion products existing on the surface of nuclear fuel and inside the primary system is very important in terms of ensuring the soundness of the equipment during operation, water chemistry management, and worker exposure management during operation. For this purpose, radiation source-terms of the material generated in nuclear power plants are periodically evaluated and managed to ensure safety. Furthermore, research and development on the topics of worker exposure management measures during

operation or considering the time of decommissioning is underway. This study can be differentiated from previous studies considering three aspects. First, previous studies on exposure dose assessment of dismantling workers were limited to considering the radioactive inventory of the major component. To improve on this, calculated the source-terms of CRUD in the core support barrel and the radiation source-terms of the material in the reactor pressure vessel to derive the results for a worker exposure dose assessment in the reactor core support barrel, including the CRUD source-terms considering the presence/absence of system decontamination at the time of decommissioning. For the full-cycle (34 cycles) operation of Kori Unit 1, the assessment shows that the source-term of CRUD in the core is $2.05E+12$ Bq at the time of permanent shutdown and $8.17E+11$ Bq at the time of decommissioning. In the radioactive assessment of the reactor pressure vessel, the result is $3.70E+11$ Bq at the time of permanent shutdown and $1.48E+11$ Bq at the time of decommissioning. Second, based on the derived source-terms, we used the Monte Carlo code to obtain exposure dose assessment results for the decommissioning workers of the nuclear power plant, including the CRUD in the core support barrel. The result due to the CRUD in the core at the expected decommissioning time is $2.37E-02$ mSv/h, and the result due to the radiation of the reactor pressure vessel is $2.03E-04$ mSv/h. Third, based on the exposure dose assessment including the CRUD in the core support barrel, various types of compounds that can exist in radioactive corrosion products were derived to emphasize the need for system decontamination before CRUD removal. The need for further research was emphasized.

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 목적

원자력발전소 건설, 운영, 해체 및 방사성폐기물 관리를 포함하는 전주기 기술개발의 확보는 원자력발전을 지속적으로 수행하기 위해 필연적이며 연속성 갖추는 측면에서 매우 중요하다. 그러므로 원자력발전소에서 발생하는 방사성폐기물은 특성 및 방사능 준위에 따라 적절히 관리되고 있으며 기준에 따른 처분방식과 연계한 관리가 계획되어 있다.

원자력발전소에서 발생하는 방사성물질의 선원항 정보는 전주기에 걸쳐 예측 및 분석되어야 하므로 국내 원자력발전소에서는 주요 설계 자료로서 최종안전성분석 보고서 작성 및 개정을 지속적으로 진행하고 있다.

최종안전성분석보고서에서는 차폐설계, 피폭선량평가, 계통관리를 위한 주요 입력인자인 방사선원항의 확보방안을 다루고 있으며 원자로 냉각계통에서의 재질에 따른 방사화부식생성물인 크러드의 선원항 정보를 제시하고 있다. 이를 위해 원자력발전소에서 발생하는 방사선원항에 대해 주기적으로 안전성을 확보하기 위한 평가를 수행하고 있으며 운영 중 또는 해체시점을 고려한 작업자 피폭관리 방안과 연계하여 연구개발을 진행 중에 있는 상황이다.

원자력발전소 1차계통에서 발생하는 방사성폐기물은 운영 중 중성자로 인해 방사화되며 이러한 물질은 방사성 폐기물관리 측면에서 관리의 중요성이 매우 중요하다. 특히, 핵연료 표면 및 1차계통 내부에 존재하는 중성자에 의한 방사화 부식생성물의 관리는 운영 중 기기의 건전성 확보, 수화학 관리 및 운영 중 작업자 피폭관리 측면에서 매우 중요하다. 원자력발전소에서의 부식생성물의 발생은 온도, 재질, 계통 및 기기 사용년수 등에 따라 유동적이지만, 일반적으로 운전 초기에는 부식발생률이 가파르게 상승한 후 일정시간이 경과함에 따라 부식 발생률이 평형상태에 도달하는 것으로 알려져 있다[1]. 이러한 부식생성물이 노심 내 핵연료 표면으로부터 중성자 조사에 의해 방사화부식생성물로 존재하게 되며 중성자 조사로 인한 방사화는 구조물의 구성요소에 따라 특성이 다르다. 그러므로 발생원 및 특성

정보를 정확히 확보하는 것이 매우 중요하며 해체 시 방사능 준위를 낮추기 위한 제염 공법의 선정 및 해체 작업자 피폭관리와 연관되어진다.

크러드와 관련된 기존의 연구는 운영관점에서의 건진성 확보 측면과 계통 및 기기의 방사화로 인한 작업자 안전관리 위주로 연구가 수행되어 왔다. 최근에는 방사화된 크러드의 선원향 자료 중에서 일부 사용되고 있는 국외 자료에 대해 국내 자료로 활용하기 위한 고유화 연구로서 크러드에 대한 최신연구(선원향, 두께, 농도, 노심 체류시간 등)를 진행 중에 있다. 최근 국내 원자력 관련기관에서는 첫 상용원전의 해체를 준비하는 단계에서 해체 시 발생하는 주요 계통 및 기기에 대한 선원향 평가기술개발과 관련한 연구를 수행한 바 있다.

원전 운영 또는 해체 시 크러드 방사선원향의 중요성은 차이점이 있다. 원전 운영 중에는 크러드로 인한 노심 비정상 출력 편차(Axial Offset Anomaly : AOA), 응력부식균열(Primary water Stress Corrosion Cracking : PWSCC) 방지 및 핵연료의 건진성 및 출력저하를 관리하기 위한 목적이 큰 반면에 해체 선원향 측면에서는 크러드를 고려한 해체 평가기준(지침) 마련을 목적으로 하는 해체계획 수립, 비용평가, 폐기물관리, 해체작업자 피폭저감을 위한 제염이 주요 목표이다.

위와 같은 상황에서 본 논문에서는 다음과 같은 3가지 측면을 고려하여 크러드를 고려한 통합 평가체계를 구축하여 기존연구와의 차별성 있는 연구를 제시하였다. 첫 번째, 원자로 내부구조물(노심지지 배럴) 내 크러드를 포함하는 선량평가를 기반으로 크러드 제거를 위한 계통제염 및 방사화부식생성물의 여러 화합물 형태를 고려한 추후연구의 필요성을 제고하였다. 두 번째, 기존의 해체 작업자 선량평가 관련 연구는 기기 자체에 대한 방사화재고량을 고려하는 것으로 제한성이 존재하였다. 이를 보완하기 위하여 해체 예상시점에서의 계통제염 유/무를 고려한 원자로 노심지지 배럴 내 크러드의 선원향 및 원자로 압력용기의 방사화 선원향 계산을 수행하였다. 세 번째, 도출된 선원향을 기반으로 몬테카를로 코드를 활용하여 원자로 압력용기 1m 거리에서의 노심지지 배럴 내 크러드 및 원자로 압력용기 방사화 선원향에 대한 작업자 선량평가 결과를 도출하였다.

제2절 이론적 배경 및 연구동향

원자력발전소에서 냉각재, 감속재 등으로 사용되는 경수는 다양한 용도로 활용되고 있으며 원자력발전소에서 고온의 환경에 의해 화학적으로 활성화되어 있다. 그러므로 금속재질의 특성에 따른 방사화, 부식, 침식, 침적 등의 다양한 현상이 계통 표면에서 발생되며 냉각수를 따라 용해된 상태로 이동하다가 1 차계통 및 기기 표면에 불용성 금속산화물 형태의 방사화된 물질로 존재하게 된다. 이를 크러드(Chalk River Unidentified Deposit : CRUD)로 지칭하고 있다[1].

1. 원자력발전소 크러드 관련 최근 연구동향

최근 우리나라는 원자력발전소 운영/유지관리 관점에서의 크러드 관련 연구로 “원자력 안전규제 검증기술 고도화 세부사업(2021~2026)”을 통하여 핵심기술 개발을 진행하고 있으며 세부기술인 정상운전 및 설계기준사고 환경 크러드 DB구축을 통하여 안전성 강화 측면에서의 연구를 수행 중에 있다[2].

국내 원전의 수출과 관련하여 원전 설계 자료의 국내 고유화에 대한 필요성이 제기되었으며 설계 자료인 최종안전성분석보고서(Final Safety Analysis Report : FSAR)의 주요내용 중 차폐설계, 피폭선량평가 및 계통설계 등을 수행하기 위하여 평가기준이 되는 크러드의 방사선원향에 대한 자료 확보 연구를 2023년 수행한 바 있다. 외국자료를 활용한 크러드의 선원향 확보의 한계점을 극복하기 위해 국내 APR 1400 원전 고유의 값으로 활용하기 위한 목적으로 FSAR에서 제시하고 있는 크러드 비방사능, 농도 및 핵종별 노심 체류시간 및 침적 크러드 막 두께에 대해 국내 고유의 데이터를 확보하는 연구를 수행하였다[3].

1 차계통에서의 부식완화, 원전 노심설계의 최적화 및 종사자의 피폭저감 목적의 아연주입을 통한 크러드 제거기술은 1 차 냉각수 수질관리, 1 차계통 내 냉각수에 의한 응력부식균열, 선량감소 프로그램 개발 등을 위한 연구에 적용되어 왔다. 원전 내 방사선장과 응력부식균열 현상을 완화시키고 크러드의 원인이 되는 부식생성물의 양은 감소하는 대신에 단기적인 크러드 증가에 따른 위험도가 있으므로 노심 안전성 평가결과에 따른 아연주입을 위한 계획 수립 연구를 수행 중에 있다[4].

원전에서 발생하는 크러드 선원항을 평가하기 위한 평가코드는 표 1과 같이 CRUDTRAN, CORA-II, CRUDSIM, PACTOLE, CREAT, ACE 등이 있다[5].

최근, 서울대학교에서는 가압경수로 수화학 조건에서 핵연료집합체 표면에 침적되는 크러드 거동 및 붕소잠복(Boron hideout) 현상에 따른 노심 비정상 출력 편차를 평가하고 예측하기 위해 열, 유동, 물질전달, 화학반응, 방사분해 등을 해석하는 다물리 수치해석 코드(BOTANI: CRUD Chemistry)를 개발 중에 있다.

표 1. 국내/외 크러드 평가코드별 주요 특징 [6, 7]

코드	주요 특징
CRUDTRAN	<ul style="list-style-type: none"> - 용해성 및 입자성 부식생성물의 거동 예측 - 증기발생기에서 발생하는 표면에서의 산화물 용해 거동 예측 - 노심 내 이온교환과정을 통한 침적물의 확산 평가코드
DISER	<ul style="list-style-type: none"> - 냉각재 내에 용질, 콜로이드, 입자성 부식생성물에 대해 평가 - Brownian Motion으로부터 기인되는 콜로이드 침적 평가코드
MIGA-RT	<ul style="list-style-type: none"> - PWR과 VVER 원자로에서의 부식생성물 거동을 평가 - 5 개의 node로 나누어 입자성 및 용해성 물질거동 평가코드
CPAIR	<ul style="list-style-type: none"> - PWR 1 차 냉각재 내 부식생성물에 대한 유속율과 출력 과도변경 영향을 설명하기 위해 개발 - PWR 일차 냉각재 계통과 내부 파이프 표면, 정화계통 및 노심의 부식생성물의 방사능 평가코드
CORA	<ul style="list-style-type: none"> - 마그네타이트의 용해도 사용하여 가압경수로 1 차 계통내 부식 생성물의 균일한 생성과 소멸을 에 따른 계통내 방사화 부식생성물의 거동 평가코드
CRUDSIM	<ul style="list-style-type: none"> - 1 차 냉각수에서의 Lithium, Boric acid, 온도, 출력 등을 이용하여 시간의 함수로서 석출과 용해 효과를 평가 - 1 차 계통을 in-cored와 ex-core로 나누어 이온화된 니켈 페라이트에 대해서 1 차계통 수 내 침적 평가코드

PACTOLE	<ul style="list-style-type: none"> - 가압경수로 냉각재 계통을 20개의 node로 구분 - 화학적 조건, 수력학적 조건, 유동 특성, 중성자 Flux 유무, 재질 구성 및 온도 등에 따른 부식생성물의 거동을 시간에 따른 예측 평가코드
CREAT	<ul style="list-style-type: none"> - 가용성 및 입자성 크러드의 질량 전달계수, 확산계수, 방사능 침적 계수, 방사능 방출계수, 전달 인자 활용 - 방사성 원소들이 일정한 비율로 철의 가용성 크러드에 포함되어 이동한다는 가정과 마모 효과를 고려하여 평가하는 코드
ACE	<ul style="list-style-type: none"> - 1차 냉각계통을 노심 부분과 기타 부분으로 나누고, 산화막을 외부 산화막과 내부 산화막으로 나누어 부식생성물의 거동을 분석 - 증기발생기나 1차 냉각계통 고온관 및 저온관에서의 방사화부식 생성물의 농도를 평가 코드

2. 방사화 선원항 계산 관련 연구동향

원전의 해체를 위해서는 방사화 핵종재고량의 정확한 평가가 필요하다. 특히 원자로 구조물에서의 중성자에 의한 방사화선원항을 평가하는 방법으로 구조물을 구성하는 원소의 종류, 평균 중성자 Flux, 전주기 운전이력 등을 이용한 평가코드를 활용하고 있다.

해체를 위한 방사화 분포 정밀평가 전산코드 개발 및 검증기술 개발의 경우 연구 목표 및 성과지표 설정근거가 미흡할 뿐만 아니라, 선행 개발기술이 존재하지만 추가적인 기술개발을 통한 효과성이 미흡하며 실제 해체현장 활용 가능성이 낮은 것으로 확인되었다[8]. 이를 해결하기 위한 방법으로 원전 해체경험을 보유하고 있거나 준비 중인 선진국에서는 원전구조물의 방사화재고량 평가를 위해 표 2와같이 ANISN/ORIGEN2, ANISN/ORIGEN-S 및 ANISN/DOT3.5/ORIGEN2 등의 평가코드를 활용한 다양한 코드체계를 적용해오고 있다. 국내에서는 해체를 진행 중인 연구용원자로와 해체계획을 수립중인 고리 1호기 및 월성 1호기의 경우 국가 연구개발사업 주도하에서 해체 시 발생하는 1차계통 주요 방사화구조물의 선원항을 평가하는 연구개발 과제를 3년간(2013~2016) 추진하여 수행한 바 있다.

표 2. 국내/외 해체를 위한 방사화재고량 평가방법[9]

국가	방사화재고량 평가방법
미국	<ul style="list-style-type: none"> · Trojan 원전 : ANISN/ORIGEN2 코드 체계 · Rancho Seco 원전 : ANISN/ORIGEN2 코드 체계 · Washington 원전 : ANISN/ORIGEN2 코드 체계 · NPD 원전(캐나다, CANDU) : ANISN/WIMS/ORIGEN2 코드 체계 · Yankee Rowe 원전 : MCNP/ACTIV 코드체계
EU	<ul style="list-style-type: none"> · 핀란드 OLKILUOTO, LOVIISA 원전: ANISN/ORIGEN-S 코드 체계 · 독일 Gundremmigen 원전 : ANISN/ORIGEN2 코드 체계 · 벨기에 BR-3 원전 : DORT/TRIPOLI3.2 코드 체계 · 이태리 Trino, Caorso 원전 : DOT/XSDRNPM/ORIGEN-S 코드 체계 · 러시아 WWER 원전 : ANISN/ACTIVATION 1,2 코드 체계 · 영국 WAGR 원전 : ANISN/CASK22 코드 체계
일본	<ul style="list-style-type: none"> · JPDR 연구용 원자로 : ANISN/DOT3.5/ORIGEN2 코드 체계
한국	<ul style="list-style-type: none"> · PWR 원전 : MCNP/ORIGEN2 코드 체계 · PHWR 원전 : FISPACT/ORIGEN2 및 MCNP/ORIGEN2 코드 체계

방사화선원향을 평가하기 위해서는 해체 대상원전의 운전이력자료 및 설계 자료를 검토하여 중성자를 방출하는 노심의 최적의 평가주기를 설정하는 단계가 필요하다. 이와 관련하여 노심 내 핵연료의 영역별 평균연소도를 기반으로 열중성자 Flux 및 방사화재고량을 도출하기 위한 코드별 주요 특성은 표 3에 나타내었다.

표 3. 중성자 Flux 및 방사화재고량 계산을 위한 평가코드 주요 특징[10]

코드	소개
ANISN	<ul style="list-style-type: none"> - Los Alamos에서 개발한 DTF-II code를 기반으로 Oak Ridge National Laboratory에서 Boltzmann Transport Equation을 활용 - 핵분열, 산란, 외부 중성자에 의한 중성자 생성 계산, 반응단면적, 중성자 Flux, 에너지 의존성 값을 활용하여 Geometry에 대해서 중성자 차폐해석, 유효증배계수 및 Critical size 등을 해석하는 코드
DORT	<ul style="list-style-type: none"> - 2 차원 각 분할법에 의한 수송방정식(Discrete Ordinate Method)의 해를 구하는 코드이며 연구용원자로 적용하기 위해 개발
HELIOS	<ul style="list-style-type: none"> - 2 차원 코드로서 복잡한 Geometry를 자세히 모사하여 계산가능하며 고 핵연료의 연소이력을 계산 - 보통 핵연료집합체의 균질화 계산에 사용되며 입력문(AURORA) 작성과 계산(HELIOS), 계산결과의 출력(ZENITH)로 구분 - 충돌확률법을 적용하여 수송방정식의 해를 구하는 코드
MCNP	<ul style="list-style-type: none"> - Monte carlo Method를 적용하여 해를 구하는 코드 - 난수를 생성하여 표본을 무작위로 추출하여 중성자의 거동을 통계적으로 모사하여 추적, 집계하며 3차원으로 Geometry를 모사하므로 원자로 구조물에서의 중성자 Flux 계산에 사용할 수 있는 코드
PHITS	<ul style="list-style-type: none"> - 고에너지가속기의 차폐계산용으로 만들어졌으며 계산결과의 모사 기능이 우수하여 각각의 Geometry를 시뮬레이션 하는 유용한 기능 보유한 코드
ORIGEN2	<ul style="list-style-type: none"> - 사용후핵연료의 방사성핵종의 구성비와 핵물질의 특성을 계산하는 것으로 ORIGEN2는 one group 핵연료의 연소이력에 따라 생성되는 핵종과 초우라늄핵종 및 핵분열생성물의 생성량이나 방사능의 선원을 계산하는 코드
FISPACT	<ul style="list-style-type: none"> - 다단반응, 양자 및 중앙자에 의한 방사화 계산을 수행하는 코드

3. 해체 시 작업자 안전성 평가관련 연구동향

원자력안전위원회고시 제2019-10호 “방사선방호 등에 관한 기준”에서 제시하는 작업자 피폭선량 허용기준인 20 mSv/yr 이하로 유지하는 것을 목표로 하는 해체 작업은 피폭선량 및 방사성폐기물 저감을 필요로 하며 목적에 따른 계통 및 기기 제염으로 분류, 방법에 따른 물리적, 화학적 및 전기적 제염으로 분류하여 단계별 해체 기술을 개발하였다. 특히, 국내에서는 원전해체 경쟁력 강화 기술개발사업 예비타당성조사 보고서를 발간하여 해체 현장 정보 기반 작업 안전성 강화기술개발 연구를 분석한 바 있다. 국내 R&D 주관부서인 산업통상자원부와 과학기술정보통신부는 방사선 작업자 안전관리 기술에 대해서 해체 시 작업자 피폭선량 평가 분석기술 및 오염도/선량 변화 예측 평가기술 개발 관련연구를 지속적으로 수행해왔으며, 원자력 진흥위원회 목표인 TRL 8 ~ 9 를 만족하는 결과를 창출한 것으로 분석되었다.

대표적으로 방사화 분포 전산해석 기술은 표 4에서 제시하고 있는 평가도구를 활용한 결과를 해체 작업자의 안전성 평가에 사용하고 있는 추세이다.

표 4. 해체 작업자 선량평가 코드 주요 특징[11~14]

코드	소개
MCNP	<ul style="list-style-type: none"> - Monte Carlo 법을 이용하여 선량의 분포를 계산하며 광자에 의한 흡수선량의 평가에 대해서 광자와 매질간의 상호작용이 일어날 확률에 따라 광자의 행적(History)을 추적하는 평가 코드
PHITS	<ul style="list-style-type: none"> - 중성자에 의한 평균 등가선량은 T-deposit의 weighted sum 명령어를 사용하여 중성자의 입사 에너지에 따른 방사선 가중치를 반영한 흡수선량 값을 곱한 데이터를 전산 모사 한 후 평균 등가선량을 계산하는 코드
Geant4	<ul style="list-style-type: none"> - 전산모사를 위한 물질, 물체와 입자의 상호작용, 입자의 추적, 수치화 등의 시각화 및 사용자 인터페이스 입자 물리학의 전산모사가 구현 가능하며 물리 모델과 실제 실험에서 얻은 데이터 결과를 기반으로 정확도를 높일 수 있게 만들어진 코드
VISIPLAN	<ul style="list-style-type: none"> - Point Kernel Integration법을 이용하여 모델링 내에서의 선량 정보 생성 및 데이터베이스화, 단위 과정별 피폭량 계산, 단위 과정별 작업자 예상 피폭량을 도시화하며 누적선량과 시간, 임무위치에서의 선량, 최소 및 최대의 선량, 선원 민감도분석 등을 평가 가능한 코드.
FLUKA	<ul style="list-style-type: none"> - 몬테카를로 시뮬레이션의 부식생성물 활동의 CoPRA 모델링을 기반으로 하며 부식 방출의 고체 확산 메커니즘에 기반한 부식생성물 방출과 예측 CPA를 사용하여 RCS의 방사선량률을 계산하는 코드
Micro Shield	<ul style="list-style-type: none"> - 에너지 플루언스율과 피폭시간, 선량환산계수를 이용하여 물리적 수식을 바탕으로 계산하며 부피선원을 다수의 점선원으로 나누어 계산하는 점커널방법을 활용하는 결정론적 계산 코드

4. 방사화부식생성물 화학적 형태를 고려한 계통제염 연구동향

일반적으로 크러드의 농도는 정상운전 중 10 ~ 20 ppb 정도이며 입자 크기는 1 ~ 10 μm 정도로 보고된다. 크러드를 구성하는 주요 성분은 그림 1과 같이 Fe, Cr, Ni 을 포함하는 화합물이 주요 종을 이루고 있으며 그 외 크러드를 구성하는 주요 성분으로 Co가 있다. 일반적으로 스테인레스 강과 인코넬 재질에서는 Co가 0.1 % 내외로 함유되어 있으나 크러드의 성분을 분석하면 1 % 이상으로 보고되고 있다[1].

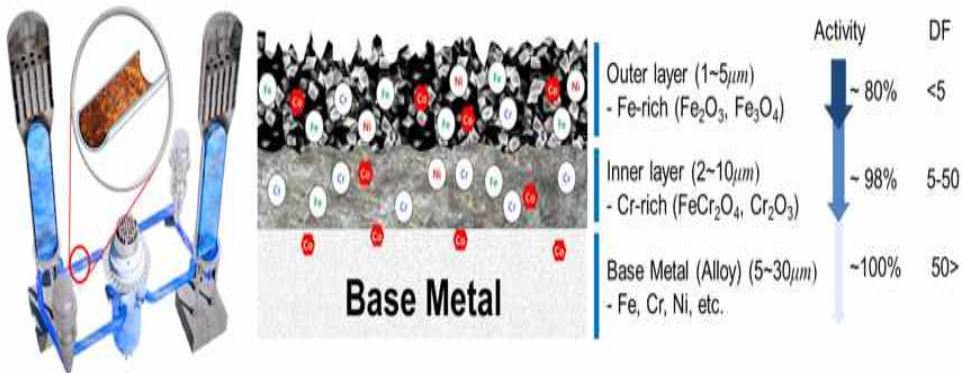


그림 1. 크러드를 구성하는 주요 성분 및 특성[15]

원전에서 발생하는 부식생성물의 화합물 형태를 도출하기 위해서는 HSC Chemistry, FactSage, Thermo-Calc, MULTEQ V9 등과 같이 열화학 데이터베이스를 기반을 하는 열역학적 코드를 활용하여 도출할 수 있으며, 현재까지 일부 화합물형태는 규명되어 있으나 추가연구가 필요한 상황이다.

본 논문에서는 표면오염으로 존재하는 방사화부식생성물에 대한 제염의 필요성을 부각시키고자 화학적 제염기술에 대해 기술하였다. 원전 해체 시 주로 표면에 고착화된 오염물질을 제거하기 위해 사용하는 제염방법으로 화학적 제염기술을 많이 사용하고 있으며 물리적 제염기술은 화학적 제염을 보완하거나 대안으로 사용하고 있다.

화학적 제염기술은 크게 표 5와 같은 특성을 갖고 있으며, 원전 해체 시에는 작업자 피폭관리를 위한 목적으로 높은 제염계수(Decontamination Factor)를 갖거나

다른 제염 방법들과 복합적으로 사용가능한 제염기술이 선호된다[16].

금속표면에 생성된 부식산화물은 산화제 및 환원제를 교차 적용하는 방법이 효과적이며, 저농도 화학제염에 있어 환원적인 방법에 의한 제염방법은 착화제(유기산, EDTA 등)를 사용하는 CAN-DECON 공정과 금속 이온을 환원제로 하여 산 용액을 착화제로 사용하는 LOMI 공정으로 분류된다. 산화제염 공정에서 금속이온은 Cr, Ni, Fe 순으로 환원제염 공정에서는 Fe, Cr, Ni 순으로 용해반응이 평형에 가깝게 도달한 것으로 조사되었다.

원전해체 경험이 있는 선진국에서는 계통제염을 위한 목적으로 DfD, HP/CORD UV, LOMI, CANDEREM™, CITROX, REMCON, NITROX 등을 개발하였으며 단계별 화학제염공정에 따른 화합물 형태를 고려한 제염원리는 그림 2와 같다. 해체 원전에서의 현장적용 경험으로는 Maine Yankee, Big Rock Point 원전에서는 DfD 기술을 계통제염기술로 활용하였으며, Connecticut Yankee 원전에서는 CORD 기술을 Jose Cabrera 원전에서는 혼합방법(NITTROX+DfD)을 활용한 바 있다[16].

국내에서는 원전해체 경쟁력강화 R&D 사업을 통해 유기착화성, 무착화성 화학제염기술 개발에 대한 자립화를 완료하였으며, 2030년까지 고도화 및 상용화를 위한 실증기술개발과 경험축적에 중점을 두고 있다.

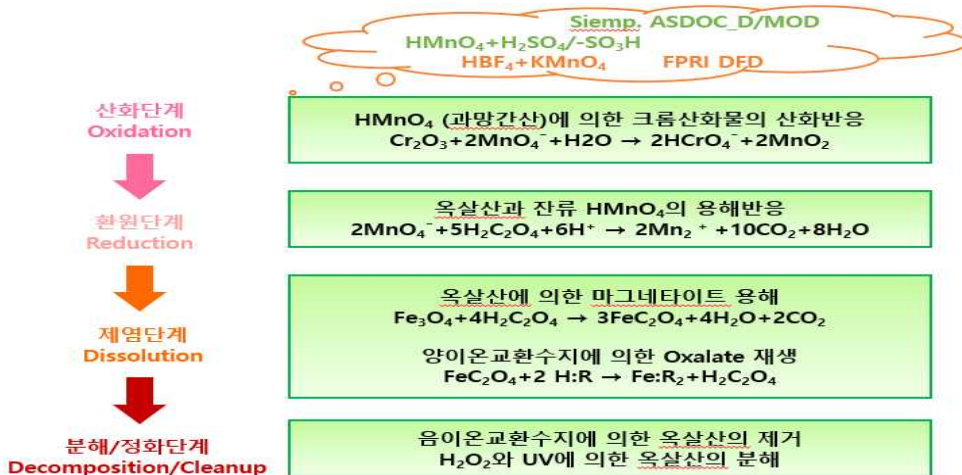


그림 2. 산화/환원 계통제염 단계별 내용[17]

표 5. 주요 화학적 제염기술의 특성[16]

코드	특성
킬레이트 및 유기산	<ul style="list-style-type: none"> - 킬레이트화 반응은 유기화합제를 금속 이온에 결합시키는 것으로 화합제와 결합된 금속 이온은 불용 상태의 금속으로부터 분리되어 용액으로 이동 및 제거 - 장점으로는 다양한 제염목적에 위한 화학작용제의 조합이 가능하며, 다른 화학제염 기술에 비해 안전 - 단점으로는 전문적인 기술과 지식이 요구되며 폐기물처리를 위한 오염물질 안정화 작업 및 오염물질의 유동성으로 인한 위험이 존재
강 무기산 및 화학작용제	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적 제염에 사용되는 강 무기산의 종류로는 염산, 질산, 황산, 인산 등이 있으며 산으로 인해 수소이온이 생성되어 오염물질의 산화물 격자를 해제하는 제염방법 - 장점으로는 높은 온도 및 농도로 접촉시간에 따라 금속 기저에 깊이 존재하는 오염물질도 제거할 수 있으며 금속의 부식생성물을 제거하는데 효과적 - 단점으로는 취급시 안전과 관련하여 높은 주의가 요구
산화제 및 환원제	<ul style="list-style-type: none"> - 주로 금속에서의 부식생성물, 철 및 크롬 산화물을 제거하기 위해 사용하여 표면오염을 제거 - 장점으로는 적은양의 화학작용제로 효과적인 제염을 달성할 수 있으며 다른 제염 방법들과 복합적으로 사용이 가능 단점으로는 산화 및 환원 조건이 성립되는 환경이 갖추어져야 된다. - 단점으로는 제염과정에서 산을 많이 사용하기 때문에 발생된 폐기물의 중화가 필요하며 산화 및 환원 조건의 성립되어야 하며 용해된 방사성물질과 기타 독성물질들은 대부분 이온교환수지에서 제거되므로 폐수지를 안정화시키고 처분하는 절차가 요구
TechXtract	<ul style="list-style-type: none"> - 화학작용제를 사용하여 콘크리트, 벽돌, 나무, 금속 등에 고착화 되어 있는 방사성물질, PCB, 기타 유해한 유기물 및 무기물을 제거 - 비 다공성(Non-porous) 표면과 미세기공이 있는 표면의 오염물질의 제염에 주로 사용되며 화학작용제가 오염지역 표면에서의 화학반응 후 물리적 도구를 활용하면 물리화학적 힘에 의해 화학작용제는 오염물질의 기저까지 침투하게 되고 화학적 또는 정전기적으로 결합하여 제염을 수행 - 장점으로는 제염특성에 맞게 화학작용제 조합이 가능 - 단점으로는 회분식(Batch)으로 작은 오염 설비를 활용한 제염 및 오염물질에 대한 최적화 과정이 필요

제2장 연구방법 및 범위

제1절 고려사항 및 연계방안

1. 주요 핵종 선정 방법론

원자로 내 핵연료에서의 중성자 방사화로 인한 주요 방사화구조물(Reactor Pressure Vessel, Core, Steam Generator etc.)은 영구정지 직후 방사화구조물(해체 폐기물) 내에 알파선, 베타선, 감마선 등을 방출하는 수많은 핵종이 존재한다. 해체 폐기물 내 원자로 노심지지 배럴의 표면오염으로 존재하는 수많은 핵종을 모두 고려하는 것은 본 논문에서의 목적을 달성하기 위해서 타당하지 않는 것으로 판단하였다. 이를 위해 해체 시점에서의 작업자 피폭선량 평가(외부피폭)와 관련된 크러드의 선원향을 도출하기 위한 고려사항으로 대표핵종을 선별하였다.

평가하고자 하는 핵종의 선정단계를 도출하기 위한 참고자료로서 국외 및 국내 규제지침을 조사하여 대표핵종을 도출하였다.

IAEA RS-G-1.7(Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance)에서는 IAEA GSR Part 3의 규제제외, 규제면제, 규제해제 개념에 근거가 되며, 규제면제 또는 규제해제를 위한 핵종별 농도 기준의 유도근거인 선량기준(개인선량 : $10 \mu\text{Sv/y}$, 집단선량 : $1 \text{ man}\cdot\text{Sv/y}$)을 제시하고 있다. 식품 및 음용수를 제외한 모든 물질에 적용 가능하며, 자연 방사성핵종과 257 개의 인공 방사성핵종 농도 기준을 제시하고 있다[18].

국내 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정(원자력안전위원회고시 제 2023-7 호)에서는 방사성폐기물의 처분관점에서 방사성핵종별 자체처분 허용농도 또는 자체처분 허용선량을 만족함이 입증되는 농도에 대해서 자체처분이 가능하도록 명시하고 있다[19].

표 6은 방사성핵종은 원자력관계사업자(자체처분사업자)가 방사능 검출목표를 설정하여 계측기 등을 활용하여 검출해야 하는 대부분의 핵종 및 농도를 제시하고 있으며, IAEA RS-G-1.7에서 제시하는 방사성핵종 수보다 더 많은 핵종을 대상으

로 하고 있다. 그러므로 본 논문에서의 원전 해체 시 작업자의 외부피폭 방호측면에서의 방사성핵종을 선정하기 위한 기준 핵종은 방사성핵종별 자체처분 허용농도를 기반으로 단계별로 도출하였다.

표 6. 크러드 내 주요 핵종 선정을 위한 기준 핵종[19]

방사성 핵종	허용농도 (Bq/g)
I-129	0.01
Na-22, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-60, Zn-65, Nb-94, Ru-106, Ag-110m, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Ta-182, Bi-207, Th-229, U-232, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-249, Cf-251, Es-254	0.1
C-14, Na-24, Cl-36, Sc-48, V-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Se-75, Br-82, Sr-85, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Tc-96, Tc-99, Ru-103, Ag-105, Cd-109, Sn-113, Sb-124, Te-123m, Te-132, Cs-136, Ba-140, La-140, Ce-139, Eu-155, Tb-160, Hf-181, Os-185, Ir-190, Ir-192, Tl-204, Bi-206, U-233, Np-237, Pu-236, Cm-243, Cm-244, Cf-248, Cf-250, Cf-252, Cf-254	1
Be-7, F-18, Cl-38, K-43, Ca-47, Mn-51, Mn-52m, Mn-56, Fe-52, Co-55, Co-62m, Ni-65, Zn-69m, Ga-72, As-74, As-76, Sr-91, Sr-92, Zr-93, Zr-97, Nb-93m, Nb-97, Nb-98, Mo-90, Mo-93, Mo-99, Mo-101, Tc-97, Ru-97, Ru-105, Cd-115, In-111, In-114m, Sn-125, Sb-122, Te-127m, Te-129m, Te-131m, Te-133, Te-133m, Te-134, I-126, I-130, I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, Cs-129, Cs-132, Cs-138, Ba-131, Ce-143, Ce-144, Gd-153, W-181, W-187, Pt-191, Au-198, Hg-203, Tl-200, Tl-202, Pb-203, Po-203, Po-205, Po-207, Ra-225, Pa-230, Pa-233, U-230b, U-236, Np-240, Pu-241, Cm-242, Es-254m	10
H-3, S-35, K-42, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-59, Ni-63, Cu-64, Rb-86, Sr-85m, Sr-87m, Y-91, Y-91m, Y-92, Y-93, Tc-97m, Tc-99m, Rh-105, Pd-109, Ag-111, Cd-115m, In-113m, In-115m, Te-129, Te-131, I-123, I-125, Cs-135, Ce-141, Pr-142, Nd-147, Nd-149, Sm-153, Eu-152m, Gd-159, Dy-166, Ho-166, Er-171, Tm-170, Yb-175, Lu-177, Re-188, Os-191, Os-193, Ir-194, Pt-197m, Au-199, Hg-197, Hg-197m, Tl-201, Ra-227, U-231, U-237, U-239, U-240, Np-239, Pu-234, Pu-235, Pu-237, Bk-249, Cf-253, Es-253, Fm-255	100
Si-31, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, As-73, As-77, Sr-89, Y-90, Tc-96m, Pd-103, Te-125m, Te-127, Cs-131, Cs-134m, Pr-143, Pm-147, Pm-149, Sm-151, Dy-165, Er-169, Tm-171, W-185, Re-186, Os-191m, Pt-193m, Pt-197, At-211, Th-226, Pu-243, Am-242, Cf-246	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

가. 발생원에 따른 핵종별 동위원소의 분류

본 단계에서는 크러드에 존재하는 평가핵종을 선별하기 위한 첫 단계로서 핵분열생성물, 중성자에 의한 방사화생성물, 냉각수로 인한 부식생성물, 기타 불순물의 방사화에서 발생하는 주요 핵종들의 동위원소를 포함하여 다음과 같은 분류방법으로 표 7 과 같이 정리하였다.

첫째, 주요 핵분열생성물(U-235)은 생성비율에 따라 Cs-133, I-135, Zr-93, Mo-99, Cs-137, Tc-99, Sr-90, I-131, Pm-147, Sm-149, I-129, Sm-151, Ru-106, Kr-85, Pd-107, Se-79 등의 핵종이 고려된다. 둘째, 중성자에 의한 방사화부식생성물은 구조물에 따라 주요 기기배관(Fe, Cr, Ni 합금), 연료피복관(Zr, Sn, Fe, Cr), 기타구조물(Co)에서 고려되는 대상핵종으로 Mn-54, Cu-64, W-137, Co-58, Co-60, Cr-51, Fe-59, Zn-65, Ag-110m, Zr-95 등이다. 셋째, 냉각수에 의한 부식생성물은 가압경수로의 경우 Mn-54, Mn-56, Co-58, Fe-59, Co-60 이 주요 고려 핵종이다. 넷째, 기타 불순물에 의한 방사화는 H-3, N-13, N-16, N-17, O-19, F-18 이 주요 고려 핵종이다[20].

표 7. 1 차계통 내 발생원을 고려한 주요 핵종 도출

핵종			
Ag-105	Cs-137	Mn-53	Sr-87m
Ag-110m	Cs-138	Mn-54	Sr-89
Ag-111	Cu-64	Mn-56	Sr-90
Co-55	Fe-52	Mo-101	Sr-91
Co-56	Fe-55	Mo-90	Sr-92
Co-57	Fe-59	Mo-93	Tc-96
Co-58	H-3	Mo-99	Tc-96m
Co-58m	I-123	Pd-103	Tc-97
Co-60	I-125	Pd-109	Tc-97m
Co-60m	I-126	Pm-147	Tc-99
Co-61	I-129	Pm-149	Tc-99m

Co-62m	I-130	Ru-103	W-181
Cr-51	I-131	Ru-105	W-185
Cs-129	I-132	Ru-106	W-187
Cs-131	I-133	Ru-97	Zn-65
Cs-132	I-134	Se-75	Zn-69
Cs-134	I-135	Sm-151	Zn-69m
Cs-134m	Mn-51	Sm-153	Zr-93
Cs-135	Mn-52	Sr-85	Zr-95
Cs-136	Mn-52m	Sr-85m	Zr-97

나. 해체 시점의 반감기를 고려한 주요 방사성핵종

해체 시점에서 고려되는 크리드 내 주요 방사성핵종을 선정하기 위해서는 반감기를 고려한 핵종의 선정이 필요하다. 원전 해체는 영구정지 승인 이후 5년 이내에 최종해체계획서를 규제기관에 제출하여야 하며 약 2년의 규제기관의 승인 이후 해체작업에 착수하게 된다. 방사성핵종별 고유 반감기는 지수함수로서 약 10 배이상의 반감기를 거칠 경우 방사능량은 거의 0에 수렴하게 되므로 본 단계에서는 표 7에서의 핵종 중에서 영구정지 이후 약 7년 동안 대략 10 배의 반감기가 도래하는 250 일 미만인 핵종은 제외하였으며, 핵종분류 결과는 표 8 과 같다.

표 8. 250일 이상의 반감기를 갖는 핵종 분류

핵종	반감기	핵종	반감기	핵종	반감기
Ru-106	373.59 d	H-3	12.32 y	Sm-151	90 y
Co-57	271.74 d	I-129	1.57E+07 y	Sr-90	28.90 y
Co-60	5.27 y	Mn-53	3.74E+06 y	Tc-97	2.6E+06 y
Cs-134	2.06 y	Mn-54	312.3 d	Tc-99	2.11E+05 y
Cs-135	2.3E+06 y	Mo-93	4,000 y	Zn-65	243.66 d
Cs-137	30.16 y	Pm-147	2.62 y	Zr-93	1.53E+06 y
Fe-55	2.73 y				

다. 감마선 방출과 관련된 주요 핵종의 분류 및 특성

핵종의 붕괴형식 중 핵이성체 전이는 여기상태 전이, 준여기상태의 전이, 내부전환에 의해 감마선 및 특성 X 선을 방출하며, 대부분의 감마선을 방출하는 핵종은 알파 및 베타 붕괴 후 원자핵이 불안정한 여기상태로 존재할 때 안정한 상태로 변환되기 위하여 에너지를 방출하는 특성을 갖고 있다. 그러므로 표 8에서의 핵종을 대상으로 핵종붕괴 시 감마선을 방출하는 핵종을 표 9와같이 분류하였다.

표 9. 감마선 방출 및 생성 메커니즘에 따른 핵종 분류

핵종	반감기	붕괴방식	생성 메커니즘
Mn-54	312.03 d	β^- , IT	방사화생성물
Co-60	5.27 y	β^- , IT	방사화생성물
Cs-134	2.06 y	β^- , IT	핵분열생성물
Cs-135	2.3E+06 y	β^- , IT	핵분열생성물
Cs-137	30.17 y	EC, IT	핵분열생성물
I-129	1.57E+07 y	β^- , IT	핵분열생성물
Tc-99	2.11E+05 y	β^- , IT	핵분열생성물

라. 생성메커니즘 및 흡수단면적의 특성을 고려한 최종 선정

6 개의 핵종에서 Co-60 과 Mn-54 를 제외한 나머지 핵종은 원자로의 연료봉에서의 방사화로 인하여 만들어진 물질로 흔히 원자력발전소의 중대사고 발생 시 발견되는 핵분열생성물이다. 구조적 안전성이 확보된 경우에는 검출 되지 않으므로 해체 시 평가를 위한 핵종에서는 제외하는 것이 타당하다고 판단되며, Mn-54 의 경우에는 반감기가 약 312 일 정도이므로 해체시점에는 상당부분의 방사능이 감소된다. 또한, 방사화로 인한 생성메커니즘을 보면 Fe-54 (n,p) Mn-54 반응에서의 중성자 흡수단면적이 Co-59 (n,r) Co-60 대비 약 1/270 수준으로 큰 차이를 보이므로 배제하였다[21].

본 논문에서 최종 선정된 Co-60 의 생성은 크게 두 가지로 설명된다. 첫 번째, 불안정한 방사성동위원소에 의해 Fe-60 이 베타 붕괴를 통해 Co-60 으로 붕괴한 후 최종적으로 Ni-60 으로 붕괴하는 과정에서 생성된다. 두 번째, 안정적인 동위원소 Co-59 에서의 (n,r) 반응에 의하여 인공적으로 생성된다. 원자력발전소에서 1 차 계통에서 발생하는 Co-60 은 두 번째 반응에 의해 생성되며, 고에너지 감마선을 방출하기 때문에 외부피폭 평가를 위한 선원항에서의 주요 핵종으로 선정하였다.

2. 부식생성물 내 화합물 형태 및 계통 제염방법

부식생성물 및 크러드의 생성과 관련한 주요 메커니즘은 다음과 같은 반응에 의해 생성된다. 첫째, 물의 방사화 반응으로 핵연료에서 핵분열에 반응에 의해 생성되는 중성자와 감마선은 물과 반응하여 e^- , H^+ , H , OH^+ , OH^- , H_2 , H_2O_2 와 같은 분자를 생성시킨다. 알파선과 중성자는 주로 분자 형태의 부산물을 생성시키는 반면 감마선은 라디칼 부산물을 생성시킨다. 둘째, 물의 이온화 반응으로 수용액에서 물 분자는 OH^+ 와 OH^- 로 이온화 된다. 셋째, 냉각재와 동일한 조성을 갖는 붕산과 LiOH가 크러드 표면을 통하여 크러드층의 기공으로 유입되어진다. 넷째, 붕소는 $LiBO_2$ 와 $Fe(BO_2)_2$ 로 침전한다. 다섯째, 금속성분의 화학반응 및 전기화학반응에 의해 생성되거나 소멸되는 화학종은 용액에 존재하는 다른 화학종과 반응하여 빠르게 평형상태에 도달하며 용존수소의 산화/환원 반응의 의해 생성된다[22].

본 논문에서는 원전 운영 시 발생하는 부식생성물 및 크러드 내 존재 가능한 화합물의 형태를 도출하기 위한 평가기준을 마련하였으며, HSC Chemistry 평가코드를 활용하여 열역학적 반응에 의한 평가결과를 도출하였다.

평가를 위한 기준으로서 1 차계통 주요구성품의 재질인 Alloy 합금강을 대상으로 선정하였으며 주요 구성 원소정보는 Mill Test Certificate 자료를 참고하였다.

표 10에서는 각 원소별 동위원소를 포함하는 주요특징을 나타내었으며, 주요 구성 원소 중에서 방사화에 기여하는 Co, Fe, Ni, Cr와 원전 운영 시 고려되는 Zn, Li, B을 추가하여 화합물의 형태를 도출하였다.

표 10. 1 차계통 주요 구성품의 원소별 특성

주요원소	동위원소	존재비	반감기	주요 생성반응	붕괴방식	딸핵종
Cobalt	Co-56	합성	77.27 d	Fe-56 (d, 2n) Co-56 Fe-59 (p,n) Co-56	β^+	Fe-56
	Co-57	합성	271.79 d	Ni-60 (p, α) Co-57 Ni-58 (p,pn) Ni-57(EC, β^+) Co-57	EC	Fe-57
	Co-58	합성	70.86 d	Ni-58 (n, p) Co-58	β^+	Fe-58
	Co-59	100 %	안정 (Stable)			
	Co-60	합성	5.2714 y	Co-59 (n, γ) Co-60 Co-60m \rightarrow Co-60	β^-, γ	Ni-60
Ferrum	Fe-54	5.80 %	안정 (Stable)			
	Fe-55	합성	2.73 y	Fe-54 (n, γ) Fe-55 Mn-55(p,n)Fe-55	EC	Mn-55
	Fe-56	91.72 %	안정 (Stable)			
	Fe-57	2.20 %	안정 (Stable)			
	Fe-58	0.28 %	안정 (Stable)			
	Fe-59	합성	44.503 d	Fe-58 (n, γ) Fe-59	β^-	Co-59
	Fe-60	합성	2.62E+06 y	-	β^-	Co-60

Nickel	Ni-56	합성	6.075 d	-	β^+	Co-60
	Ni-58	68.08 %	안정 (Stable)			
	Ni-59	합성	76,000 y	Ni-58 (n, γ) Ni-59	EC, β^+	Co-59
	Ni-60	26.23 %	안정 (Stable)			
	Ni-61	1.14 %	안정 (Stable)			
	Ni-62	3.63 %	안정 (Stable)			
	Ni-63	합성	100.1 y	Ni-62 (n, γ) Ni-63	β^-	Cu-63
	Ni-64	0.93 %	안정 (Stable)			
Chromium	Cr-50	4.35 %	1.8E+17 y	관측안정 (Observationally Stable)		
	Cr-51	인공	27.7025 d	Cr-50 (n, γ) Cr-51 V-51 (d,2n) Cr-51	EC	V-51
	Cr-52	83.79 %	안정 (Stable)			
	Cr-53	9.50 %	안정 (Stable)			
	Cr-54	2.37 %	안정 (Stable)			
Zinc	Zn-64	48.60 %	안정 (Stable)			
	Zn-65	합성	244.26d	Zn-64 (n, γ) Zn-65 Cu-65 (p,n) Zn-65 Cu-65 (d,2n) Zn-65	β^+	Cu-65
	Zn-66	27.90 %	안정 (Stable)			
	Zn-67	4.10 %	안정 (Stable)			
	Zn-68	18.80 %	안정 (Stable)			
	Zn-70	0.60 %	안정 (Stable)			
Lithium	Li-6	7.50 %	안정 (Stable)			
	Li-7	92.50 %	안정 (Stable)			
Boron	B-10	19.90 %	안정 (Stable)			
	B-11	80.10 %	안정 (Stable)			

냉각재 계통에서는 경수(H₂O)를 사용하므로 금속재질을 구성하는 성분 외에도 수소(H)와 산소(O)가 포함되어있는 환경으로 고려하였으며, HSC Chemistry 코드 내 TPP Diagram 모듈을 활용하여 평가하였다.

HSC Chemistry는 다양한 화학, 열역학 등을 결합한 소프트웨어 패키지 중 하나로서, 열화학 계산은 새로운 화학공정을 개발하고 기존의 공정을 개선할 때 유용하다. 원소 및 화합물의 엔탈피(H), 엔트로피(S) 및 열용량(Cp) 데이터는 다양한 추가 정보와 함께 데이터베이스에 저장되어 있다.

본 논문에서 활용되는 TPP Diagram 모듈은 Gibbs 에너지를 기반으로 3개의 원소로 구성된 등온 조건하의 안정적인 상을 두 성분의 분압으로 보여주는 도표로 Gibbs 에너지 최소화 방법을 이용하여 두 축의 부분 압력 또는 x축의 온도와 y축의 부분 압력을 사용하여 상 안정성 다이어그램을 계산하는 모듈이다. 주어진 온도에서 두 원소들의 분압들을 축으로 하는 그래프가 작성가능하며 이때 기상은 응축상과 평형에 있으며 기상의 분압 증가는 응축 상에서의 조성 증가를 의미하게 된다. 결과적으로 주어진 온도에서 응축상의 조성변화에 따른 응축 상에서의 안정적인 화합물들이 어떻게 화학적으로 구성되는지 판단할 수 있는 도표를 제시한다.

TPP Diagram 모듈을 활용하여 평형 계산을 기반으로 평가결과를 다음과 같이 도출하였다. 원자력발전소 내 운영 중 부식생성물 및 크러드 내 존재 가능한 화합물의 형태를 도출하기 위한 목적으로 표 11과 같이 방사화부식생성물로 발생 가능한 Cr, Zn, Fe, Ni, Co 원소와 원전 운영 시 첨가제 및 냉각제로 사용되는 Li, B, H, O의 원소들이 존재하는 다양한 환경을 평가대상 및 입력인자로 선정하였다.

표 11. 부식생성물의 화합물 도출을 위한 평가환경 구축

(B, Cr, O) System	(B, Fe, O) System	(B, Ni, O) System	(B, H, O) System
(B, Co, O) System	(Li, B O) System	(Li, Cr, O) System	(Li, Fe, O) System
(Li, Ni, O) System	(Li, O, H) System	(Li, Co, O) System	(Zn, Cr, O) System
(Zn, Fe, O) System	(Zn, Ni, O) system	(Zn, H, O) System	(Zn, Co, O) System
(Ni, H ,O) System	(Ni, Fe, O) System	(Ni, Cr, O) System	(Cr, H, O) System
(Co, H, O) System	(Fe, Cr, H) System	(Fe, Cr, O) System	(Fe, H, O) System
(Ni, Fe, H) System	(Ni, Cr, H) System	(Co, Cr, O) System	

평가코드를 활용하여 도출한 화합물의 형태는 표 12와 같으며 참고문헌을 조사하여 일부 화합물 형태의 존재를 확인하였다. 다만, 크러드 내 Boron이 포함된 화합

물은 보나코레이트(Bonaccordite)로서 대상 화합물들의 침착이 증가하는 것은 두께가 59 μm 인 경우에 대해 400 $^{\circ}\text{C}$ 가 넘는 것으로 조사되었다[23]. 일반적으로 원자로 운영 중에는 냉각수 온도가 280 ~ 320 $^{\circ}\text{C}$ 내에서 온도변화가 이루어지므로 보론이 함유된 화합물은 배제할 수 있을 것이다. 향후 해체를 위한 계통제염 기술 선정 시 본 논문에서 도출된 화합물의 형태를 고려한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 12. 원전에서 발생가능한 부식생성물의 화합물 도출

화합물 형태
$\text{Ni}_2\text{FeBO}_5, \text{LiBO}_2, \text{H}_3\text{BO}_3, \text{Fe}_2\text{Fe}(\text{BO}_3)\text{O}_2, \text{Fe}_3\text{BO}_6, \text{Li}_2\text{B}_2\text{O}_4, \text{Ni}_2\text{Fe}(\text{BO}_3)\text{O}_2, \text{Li}_2\text{NiFe}_2\text{O}_4, \text{LiFeO}_2, \text{LiBO}_2, \text{ZnFeO}_4, \text{NiCr}_2\text{O}_4, \text{FeCr}_2\text{O}_4, \text{ZnCr}_2\text{O}_4, \text{CoFe}_2\text{O}_4, \text{FeB}_4\text{O}_7, \text{Fe}_2\text{B}_2\text{O}_5, \text{Fe}_3\text{BO}_5, \text{CoB}, \text{Co}_2\text{B}, \text{LiCrO}_2, \text{Li}_2\text{CrO}_4, \text{Li}_3\text{CrO}_4, \text{LiFeO}_2, \text{LiFe}_5\text{O}_8, \text{Li}_2\text{Fe}_3\text{O}_5, \text{Li}_5\text{FeO}_4, \text{Li}_2\text{O} \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{LiCoO}_2, \text{ZnCrO}_4, \text{ZnCr}_2\text{O}_4, \text{ZnO}, \text{ZnO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Fe}_{0.08}\text{Zn}_{0.92}, \text{Fe}_{0.12}\text{Zn}_{0.88}, \text{Fe}_{0.21}\text{Zn}_{0.79}, \text{Fe}_{0.31}\text{Zn}_{0.69}, \text{Zn}_{0.1}\text{Fe}_{2.9}\text{O}_4, \text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4, \text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4, \text{Zn}_{0.7}\text{Fe}_{2.3}\text{O}_4, \text{ZnFe}_2\text{O}_4, \text{ZnFe}_{29}\text{O}_{40}, \text{Zn}_3\text{Fe}_{27}\text{O}_{40}, \text{Zn}_5\text{Fe}_{25}\text{O}_{40}, \text{Zn}_7\text{Fe}_{23}\text{O}_{40}, \text{ZnCo}_3, \text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4, \text{NiO}, \text{CrO}_2, \text{CrO}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Cr}_3\text{O}_4, \text{Co}_3\text{O}_4, \text{NiFe}_2\text{O}_4, \text{Cr}_{22}\text{Ni}_8, \text{Cr}_5\text{O}_{12}, \text{Cr}_8\text{O}_{21}, \text{NiO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{FeO}_4, \text{Fe}_8\text{Cr}_{22}, \text{Fe}_{26}\text{Cr}_4, \text{FeCr}_2\text{O}_4, \text{CoCr}_2\text{O}_4, \text{CoO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$

제2절 크러드 선원항 평가

1. 크러드 생성 주요 메커니즘

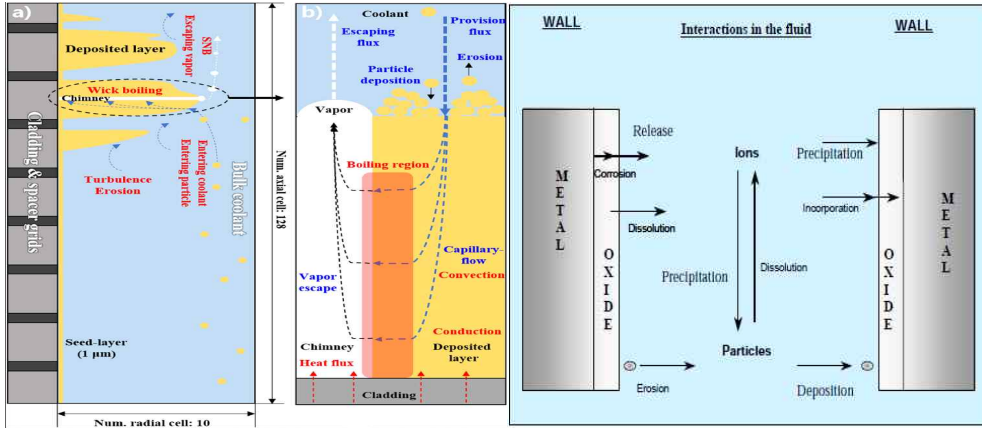


그림 3. 크러드 주요 생성 메커니즘

미립자 및 이온 형태의 Ni, Fe 기반 부식생성물은 원자력발전소의 1 차계통에서 구조 재료의 산화를 통해 생성된다. 이러한 부식생성물의 입자와 이온은 계통을 순환하여 원자로 노심의 연료봉 표면에 침착된다. 크러드 침적에 대한 이온 생성물의 기여도는 입자의 기여도와 비교할 때 무시할 만하다고 보고되고 있어 산화물 입자가 일반적으로 크러드 침적의 주요 선원항으로 간주된다[24]. 이중에서, 입자의 크기가 $0.25 \mu\text{m}$ 를 초과하는 종은 미립자로 정의하고, $0.25 \mu\text{m}$ 보다 작은 종은 콜로이드 및 나노입자로 분류하고 있다[24].

냉각수 내 크러드 입자는 연료 표면으로 운반되며, 연료봉의 표면 비등에 의해 가속화된 후 표면에 입자가 침적되어 크러드 층을 형성하며 반대로 냉각수의 난류 흐름으로 인해 금속 표면층이 침식된다. 핵연료 집합체에 있는 스페이서 그리드의 표면에는 냉각수의 난류가 비교적 강하고 표면에 와전류가 형성되어 크러드의 침적을 강력하게 방지하므로 침적 및 침식으로 인한 크러드 층의 발생은 원자력발전소의 운전 조건에 크게 의존한다[24].

2. 평가도구 및 방법

본 논문에서는 크러드의 선원향을 평가하기 위하여 CRUDTRAN 코드를 활용하였다. 이 코드는 용해성 부식생성물의 이동 및 입자성 부식생성물의 이동에 대한 균형방정식(Balance equation)이 구현되어 있으며, Fe의 용해도에 대한 모델 식을 활용한다. 아래 식 (1)은 노심 표면, 식 (2)는 냉각재, 식 (3)은 S/G 표면을 나타낸다[21].

$$\frac{dI_1}{dt} = SD \quad (1)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = SR - SD \quad (2)$$

$$\frac{dI_3}{dt} = CR - SR \quad (3)$$

여기서, I_i 는 i 지점에서의 철의 양(kg-Fe), SD는 Core 표면 상 수용성 물질의 침전률(kg/sec), SR은 S/G 표면으로부터의 수용성물질의 방출률(kg/sec), CR은 S/G Tubing에서의 부식률(kg/sec) 이다.

노심에서의 용해성 물질의 침적을 계산을 위한 방정식은 식 (4)와 같다.

$$SD = \int_{H_{in}^1}^{H_{out}^1} h_{dp} P_{w1} (C_2(x) - C_1(x)) dx \quad (4)$$

여기서, $C_i(x)$ 는 i 지점에서의 x 값에 의한 수용성 종의 농도(kg/m³), h_{dp} 는 수용성 크러드의 침전계수, P_{w1} 는 냉각수와 접촉하는 Core 표면 둘레(m), H_{in}^1, H_{out}^1 은 Core 입구 출구의 길이(m) 이다.

용해성 물질의 침적에 따른 방사화 물질의 거동 균형방정식은 다음과 같은 식 (5),(6),(7)을 사용한다.

$$\frac{dA_1}{dt} = -\lambda A_1 + \alpha P I_1 - ASR \quad (5)$$

$$\frac{dA_2}{dt} = -\lambda A_2 + ASR - ASD \quad (6)$$

$$\frac{dA_3}{dt} = -\lambda A_3 + ASD \quad (7)$$

여기서, A_i 는 i 지점에서의 방사능(Ci), λ 는 붕괴상수(Sec^{-1}), α 는 Core 내 중성자 방사화 인자(Ci/kg-Fe. % power. sec). P 는 Core의 출력(MWth), ASR 은 Core에서의 수용성 중으로써 방사능 방출률(Ci/sec), ASD 는 S/G에서의 수용성 중으로써 방사능 침전률(Ci/sec) 이다.

Core에서의 수용성 중에 대한 방사능 방출률 계산을 위한 방정식은 다음과 같은 식을 사용한다.

$$ASR = \int_{H_{in}^1}^{H_{out}^1} h_{rl}^a P_{w1} \left(\frac{A_1}{I_1} S_1 - \frac{A_2}{I_2} S_2 \right) dx \quad (8)$$

$$ASR = h_{rl}^a P_{w1} \frac{L_1}{(T_o - T_i)} \left[\frac{A_1}{I_1} \int_{t_i + \Delta T_1}^{T_0 + \Delta T_1} S \, dT - \frac{A_2}{I_2} \int_{T_i}^{T_0} S \, dT \right] \quad (9)$$

$$ASR = k_1^a \left(\frac{A_1}{I_1} S_1 - \frac{A_2}{I_2} S_2 \right) \quad (10)$$

$$S_1 = \frac{1}{(T_0 - T_i)} \int_{T_i + \Delta T_1}^{T_0 + \Delta T_1} S \, dT \quad (11)$$

$$S_2 = \frac{1}{(T_0 - T_i)} \int_{T_i}^{T_0} S \, dT \quad (12)$$

여기서, T_i 는 i 지점에서의 온도($^{\circ}\text{C}$), S_i 는 i 지점에서의 철의 용해도($\text{kg-Fe/kg-H}_2\text{O}$), k_1 는 Core 내 Crud의 Mass transfer factor(m^3/s). k_3 은 S/G 내 크러드의 Mass transfer factor(m^3/s), h_{rl}^a 는 Core에서의 수용성 종으로써 방사능의 방출 계수(m/s). h_1^a 는 Core에서의 수용성 종으로써 방사능 물질 전달 계수(m^3/s)이다.

3. 연구범위

크러드의 선원항을 평가하기 위한 기본단계로서 대상원전의 평가주기의 선정이 중요하다. 고리 1호기는 1978년 4월 29일 운전을 시작으로 2017년 6월 18일까지 운전기간은 12,010일 운전되었으며, 유지보수 기간은 2,285일이 소요되었다. 원전 1주기당 총 449일(평균 운전일수는 375일, 평균 유지보수 일수는 73일)이며, 총 32주기 동안의 운전으로 평가결과를 도출하였다. 1주기 동안의 연소 단계별 부분운전은 35일, 68일, 68일, 68일, 68일, 34일, 34일을 적용하였으며, 유지보수는 74일을 적용하였다. 데이터 확보의 어려움으로 인하여 노심지지 배럴에서의 표면적과 노심에서의 표면적을 비교하기에는 한계가 있으므로 보수적인 평가를 도출하기 위해 노심에서의 주기종료일 후 계산시점에서의 방사능재고량은 표면방사능으로서 노심지지 배럴에 존재하는 것으로 가정하였으며, 내부표면적 $2,523 \text{ m}^2$ 을 적용하였다[25].

제3절 방사화선원항 평가

1. 중성자 방사화 계산

ORIGEN2 코드는 원자로 및 차폐설계를 위한 방사성물질의 생성, 소멸, 처리계산에 널리 이용되는 코드이며 계산에 사용되는 시간에 따른 핵종농도 분포 방정식은 다음과 같은 식 (13)을 사용한다[26].

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{ij} \lambda_j X_j + \Phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \Phi \sigma_i + r_i) X_i + F_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (13)$$

여기서, X_i 는 핵종의 원자밀도, N 는 핵종의 수, l_{ij} 는 중성자 흡수로 인한 j 원소에서 i 원소로의 변환분율, λ_j 은 붕괴상수, Φ 는 중성자 Flux 밀도, f_{ik} 는 i 핵종을 형성하는 핵종 k 의 중성자 흡수비율, σ_k 는 i 핵종의 미시적 흡수단면적이다.

ORIGEN2 코드에서의 단일그룹 단면적을 활용하는 단점을 보완하기 위해 중성자 Flux 밀도를 도출하기 위한 방정식은 다음과 같으며, 중성자 Flux를 도출하기 위해서는 핵반응단면적을 확보해야한다.

MCNP에서 중성자 Flux를 계산하기 위한 수식을 활용하여 초당 발생하는 중성자 수에 F4 Tally 기능을 활용하여 구할 수 있으며 관련 수식은 다음과 같다[27].

$$P = C f \sum_i k^i N^i \sigma_f^i \Phi_{avg}^{fuel} V^{fuel} \quad (15)$$

$$C = \frac{P}{f \sum_i k^i N^i \sigma_f^i \Phi_{avg}^{fuel} V^{fuel}} = \frac{P}{f F7 Tally} \quad (16)$$

$$\Phi = C \times F4 Tally \quad (17)$$

여기서, C 는 초당 발생 중성자수, 즉, n/sec 의 단위를 갖는 변환상수, K 는 MeV 단위를 갖는 핵분열 당 발생하는 회수 에너지, N 는 핵종 수밀도, σ_f 은 핵분열 반응 단면적, I 는 핵종기호, f 는 단위환산자($1.6022E-13$ Joule/MeV), ϕ 는 구조물에서의 중성자 Flux이다.

2. 평가도구 및 방법

방사화 평가는 ORIGEN2 코드를 평가도구로 선정하였다. ORIGEN2는 원자로 및 차폐 설계를 위한 방사성물질의 생성, 소멸, 처리계산에 널리 이용되고 있다. 원자로를 하나의 점으로 보고 문제를 해석하므로 기하학적 형태에 대한 묘사가 전혀 없으며, 단일그룹 반응단면적을 라이브러리로 사용하는 한계점을 해결하기 위한 방법으로 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 코드를 활용하여 보완 가능하다[28].

MCNP는 Monte Carlo 방법론을 이용하여 중성자 수송방정식의 해를 얻으며, 난수(random number)를 생성하여 임계도 해석은 물론 중성자, 전자, 광자 또는 중성자-광자 연계문제를 통계적으로 해석하여 그 자료로서 핵단면적, 균정수를 생산할 수 있는 코드이다. 특징으로는 기하학적 형태에 대한 자유도가 매우 높으므로 복잡하게 구성되어 있는 실제 문제를 3차원적으로 거의 완벽하게 묘사할 수 있으며, 연속 핵자료집(pointwise cross section)을 사용하므로 반응단면적에 대한 근축약을 하지 않아 신뢰성이 매우 높은 장점을 가지고 있다.

ORIGEN2의 라이브러리는 노심영역을 기준으로 생산되었으므로 노심외곽 선원항 평가 시 보정없이 적용하면 많은 오차를 기인할 수 있으므로 핵단면적에 대한 보정이 필요하다. MCNP를 이용할 경우 입자 하나하나의 거동을 Tallying에 의하여 통계적으로 분석한 후 그 자료를 가지고 핵적 거동을 계수하므로 계산과정상의 근사가 매우 적다. 따라서 이를 ORIGEN 코드의 입력 자료로 대체하여 사용하면 중성자 선원항에 대해 정확도 높은 결과도출이 가능하다[10].

3. 연구범위

ORIGEN2 평가에서 활용되는 중성자 Flux 은 산업통상자원부에서 시행한 산업기술혁신사업의 기술개발 과제인 “원전 해체 선원향 평가 기술 개발”에서 도출된 바 있다. 고리 1호기 4주기와 29주기에서의 원전 운영데이터를 검토하여 중성자 Flux 을 도출하였으며, 본 논문에서는 그림 4에서의 가장 높은 4주기에 대한 최대 중성자 Flux 을 인용하여 방사화 계산에 활용하였다.

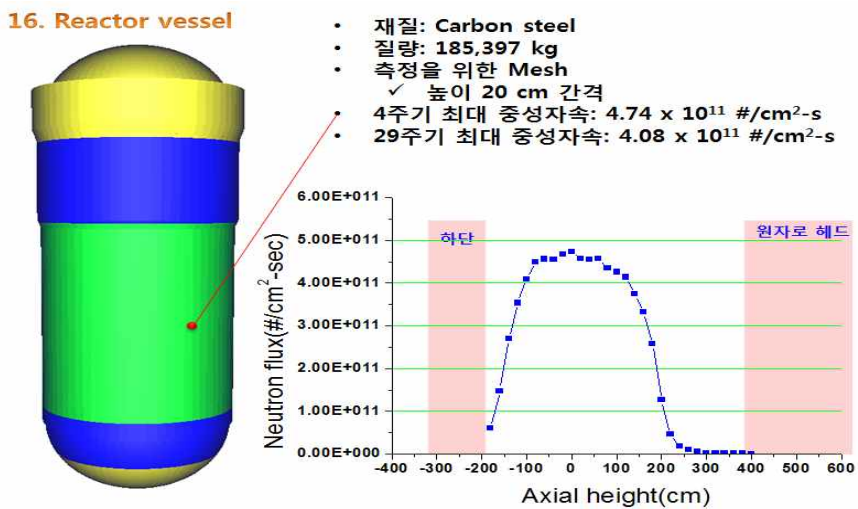


그림 4. 고리 1호기 원자로 압력용기 중성자 Flux

최대 중성자 Flux(4 주기)을 기반으로 ORIGEN2 코드를 활용하여 고리 1호기 원자로 압력용기에 대해 원전 운영기간 동안의 핵종재고량을 평가하였다. 평가결과는 대상원전의 유형, 중성자속, 운전기간, 구조물 재질 등의 입력변수에 의해 차이를 보인다. 본 논문에서는 해체 예상시점에서의 주요 방사화선원향을 활용하기 위한 목적으로 시간에 따른 반감기를 고려한 각 주기별 Co-60, Nb-94, Fe-55, Ni-59, Ni-63의 선원향을 도출하였다.

제4절 선량평가

1. 선량평가 정의

방사선량(Radiation Dose)은 방사선을 나타내기 위한 척도로서 에너지 흐름인 방사선의 진로에 물체가 방사선 에너지의 일부 또는 전부를 흡수하는 현상이기 때문에 일반적인 개념으로는 물체 단위 질량당 흡수된 방사선 에너지량을 흡수선량으로 정의하고 있다. 방사선 측정 관련하여 국제 방사선 단위 측정 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurement : ICRU)가 정의하는 근본적 흡수선량은 한 점에서의 흡수선량 개념이다. 반면 방사선 방호 권위기구인 국제 방사선 방호 위원회(International Commission on Radiological Protection : ICRP)는 일부 큰 체적(인체, 장기 등)까지 확장하는 것을 인정하고 있으며 흡수선량 평가 시 대상체적을 확장하여 얻는 값은 체적(인체, 장기 등)의 평균 흡수선량 개념이 된다[29].

본 논문에서는 선량평가를 위한 기본사항으로 작업자가 TLD를 착용하는 심부위치에 대해 흡수선량(심부선량)을 도출하였다.

흡수선량(D)이란 이온화 방사선이 질량이 dm 인 물질에 전달하는 에너지 (dE)의 평균이며 다음의 식을 활용하여 계산된다. 흡수선량 단위는 joule/kg ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)로 나타내며, gray (Gy)로도 표현한다. 등가선량은 흡수선량에 방사선 종류에 따른 생물학적 영향을 고려할 때 이용되는 지표로서 본 논문에서의 선원항은 방사선가중치(D)가 1인 광자(감마선)만을 고려하였으므로 흡수선량(D)을 등가선량으로 표현할 수 있다[29].

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} (\text{Gy}) \quad (18)$$

여기서, dm 는 질량, $d\bar{\epsilon}$ 는 물질에 전달하는 에너지 이다.

또한, 등가선량은 조직가중치를 고려할 경우 유효선량으로 환산된다. 본 논문에서는 조직가중치를 1로 고려하였으므로 작업자 선량평가를 도출한 결과로서 1 m 거

리에서의 유효선량으로 표현 가능하다.

선원을 평가하는 방법으로는 점선원법과 점커널법이 있다.

점선원법은 감마선을 방출하는 점선원으로부터 일정 거리에서의 조사선량을 쉽게 계산하는 방법이다. 방사선의 강도는 선원으로부터의 거리에 역자승에 비례하는 역자승 법칙에 따라 계산하며 실제의 방사선원에서 점선원이란 존재하지 않지만 계산의 편의상 사용하는 방법으로 예상 피폭선량을 보수적으로 평가하는 방법이다[30].

점커널법은 점선원이 아니라 상당한 크기를 갖는 선형선원이나 면적선원 또는 체적선원에 의한 비충돌선속밀도는 선원을 작게 분할하여 각 분할선원을 점선원으로 보아 계산하여 전체에 대해 합산하여 산출하는 방법이다[31].

$$D(\bar{r}) = K \int_V \frac{S(\bar{r}') B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|, E) \exp(-\mu|\bar{r}-\bar{r}'|)}{4\pi|\bar{r}-\bar{r}'|^2} dV \quad (19)$$

여기서, \bar{r} 는 감마선 선량률이 계산되는 지점, \bar{r}' 는 선원 위치, V 는 선원 체적부, $|\bar{r}-\bar{r}'|$ 은 감마 선량이 계산되는 지점과 선원과의 거리, $B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|, E)$ 는 Build-up factor, K 는 변환 인자(Flux to Dose Rate Conversion Factor)이다.

Build-up factor는 감마 에너지 및 선원에서 계산지점까지의 평균자유행정수 (Number of mean free paths)의 함수이며, 원자번호가 높은 차폐물질의 경우에는 아래와 같은 식 (20)으로 계산되며 원자번호가 낮은 차폐물질의 경우에는 다음과 같은 식 (21)이 적용된다[31].

$$B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|, E) = \sum_{j=0}^{j=4} \sum_{i=0}^{i=3} C_{ij}(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|)^i (E)^j \quad (20)$$

$$B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|, E) = \sum_{j=0}^{j=4} \sum_{i=0}^{i=3} C_{ij}(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|)^i \left(\frac{1}{E}\right)^j \quad (21)$$

2. 평가도구 및 방법

본 논문에서는 평가에 적합한 평가코드를 선정하기 위하여 몬테카를로 코드 (PHITS, MCNP, GEANT4)를 활용한 각 작업 상황별 유효선량률을 비교한 문헌을 참조하였다. 각 코드의 결과값이 유사한 유효선량 결과를 도출하는 것으로 확인하였다[32].

본 논문에서 활용하는 PHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System) 코드는 JAEA 에서 개발되었으며, 라이선스 비용이 없으며 높은 사용자 편의성을 확보하고 있다. 또한, 최신 ICRP 선량계수 산출 핵심코드로 활용되고 있으며, 국내 원자력안전기술원에서는 안전성평가 검증용 코드로 채택되어 사용되었다. PHITS 코드에서의 점커널법을 활용한 평가는 다음과 같이 정의된다. 점커널법은 차폐물질의 원자와 충돌하지 않은 광자에 의한 에너지전달을 나타내며, 이는 산란된 Photons 에 의한 효과를 보정하기 위한 Build-up factor 와 결합된다. 분포 선원 (Distributed source)의 경우, Point kernel integration 은 선원 체적(Source volume)에 대하여 적분 되는데 즉, 단위 체적 및 단위 초당 에너지가 E 인 Photons 를 S 개 방출하는 등방선원(Isotropic Source)으로부터의 감마선 선량률이 계산된다.

3. 연구범위

선원항 정보로는 CRUDTRAN을 활용한 노심지지 배럴 내부 표면에서의 크러드 선원항(Co-60)과 ORIGEN2 코드를 활용한 원자로 압력용기의 방사화선원항 (Co-60)을 적용하였다.

본 논문에서 평가대상으로 Co-60을 고려한 이유는 다음과 같다. Co-60은 고 에너지(1.17 Mev, 1.33 Mev)로서 100%의 감마선 방출비율을 갖고 있는 핵종인 반면에 Fe-55, Nb-94, Ni-59 및 Ni-63은 전자포획(EC)과 베타 붕괴하는 핵종으로 감마선 에너지 및 방출비율이 없거나 극히 적으므로 외부피폭에는 영향을 미치지 않는 핵종으로 분류하였다. 또한, 제염공정 적용에 따른 선량 평가를 도출하기 위하여 크러드 선원항이 존재하는 노심지지 배럴표면에 대해서는 계통제염으로 인한

제염계수를 고려하였다.

해체 대상물에 대한 계통 및 기기에서의 제염활동에 따른 방사능 오염제거에 대해서는 제염계수를 적용한다. 제염계수는 방사성오염이 제거되는 정도를 나타내는 척도이며, 제염계수에 대한 계산방법 식 (22),(23),(24)와 같으며 제염계수 및 제거율과의 상관관계는 표 13과 같다.

$$\text{제염계수} = \frac{\text{제염 전 표면방사선량률 (mSv/h)}}{\text{제염 후 표면방사선량률 (mSv/h)}} \quad (22)$$

$$\text{제염계수} = \frac{\text{제염 전 표면오염도 (Bq/cm}^2\text{)}}{\text{제염 후 표면오염도 (Bq/cm}^2\text{)}} \quad (23)$$

$$\text{제염계수} = \frac{\text{제염 전 방사능농도 (Bq/cm}^3\text{)}}{\text{제염 후 방사능농도 (Bq/cm}^3\text{)}} \quad (24)$$





표 13. 제염계수 및 제거율과의 상관관계

제염 전 농도	제염 후 농도	제거율	제염계수(DF)
100	20	80 %	5
	10	90 %	10
	5	95 %	20
	4	96 %	25
	2.5	97.5 %	40
	2	98 %	50
	1.25	98.7 %	80
	1	99%	100

계통 제염활동으로 인한 오염의 제거율은 제염계수가 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50을 만족할 경우에 대한 선량 평가결과를 도출하였다.

본 논문은 크리드 및 방사화선원향을 고려하여 원전 해체 시 원자로 압력용기 1m 표면에서의 작업자에게 미치는 영향을 확인하기 위한 것으로 고리 1호기 노심지지 배럴 및 원자로 압력용기에 대한 상세한 설계제원이 필요하지만 확보에 어려움이 있었다. 따라서 참고문헌을 활용하여 표 14와 같이 모델링을 통한 평가결과를 도출하였다.

표 14. 해체 작업자 선량평가 도출을 위한 기기 모델링

			
노심지지 배럴 및 압력용기 모델링	내/외부 빈공간 모델링	체적계산 모델링	유효선량 평가 범위 지정 (1 m)

제3장 평가대상 및 입력인자

제1절 크러드 선원항

고리 1 호기 노심지지 배럴 표면에서의 크러드를 평가대상으로 고려하였으며, 운전 이력 자료 및 참고문헌을 활용하여 입력인자를 표 15와 같이 도출하였다.

표 15. CRUDTRAN 구동을 위한 입력인자[25]

(1) Calculation parameter	
DAYS - duration of operation (day)	35 days, 68 days, etc. 449 days/period
IN - time step size of numerical calculation (day) : 0.1 (recommended)	0.1
NTMA - number of time step per printing output	10
NTS - number of meshes in numerical integration of solubility by temperature (normally $1 < nts < 50$) : 10 (recommended)	
BETAC- crud transport factor in CRUDTRAN	0.02
BETAA- activity transport factor in CRUDTRAN	0.002
(2) Plant operating condition	
BORON - concentration of boron (ppm)	955, 775, 595, 415, 235, 145, 55 etc.
ALIT - concentration of LiOH (ppm)	2.2
CH2 - hydrogen content (cc/kg-H ₂ O)	34.0
FLOW - coolant flow rate (kg.H ₂ O/day)	7.230E+08
ONOFF - coolant flow on or off (1 or 0)	1
P1 - % power for calculation of neutron activation	100
TIN - core inlet temperature (°C)	282.0
TOUT - core outlet temperature at full power (°C)	320.0

DTBL1 - temperature differences across boundary layer in core at full power(°C)	18
DTBL3 - temperature difference across boundary layer in S/G at full power(°C)	-5.4
FPUR - bypass flow rate of purification system (kg.H ₂ O/day)	6.5E+05
DEN - density of average coolant (kg/m ³)	963.05
VIS - viscosity of average coolant (n.sec/m ²)	3.0919E-07

(3) Output print option

INPRIN = print of input data and detailed output, on or off (1 or 0)	1
--	---

(4) Initial conditions

IH - initial crud inventory in core (kg-Fe)	1.0E-20
IC - initial crud inventory in S/G (kg-Fe)	1
AH1 - initial cobalt-60 activity in core (Ci)	0
AH2 - initial cobalt-58 activity in core (Ci)	
AC1 - initial cobalt-60 activity in S/G (Ci)	
AC2 - initial cobalt-58 activity in S/G (Ci)	
AD1 - initial cobalt-60 activity in purification system (Ci)	
AD2 - initial cobalt-58 activity in purification system (Ci)	

(5) Option

IREF = refuelling of fuel assemblies, on or off (1 or 0)	1
IPAR = particulate precipitation in coolant, on or off (1 or 0)	0
NRF = No. of refuelling times	32
RF(i) = Refuelling time(day)	375, 824(375+449), 1273(824+449), , . . .

(6) Plant geometry

DE1 - hydraulic diameter of core fuel channel (m)	1.480E-02
DE3 - hydraulic diameter of S/G tube (m)	1.69E-02
AR1 - surface area of core (m ²)	2,523
AR3 - surface area of S/G (m ²)	1.024E+04
AF1 - coolant flow area in core (m ²)	2.715
AF3 - coolant flow area in S/G (m ²)	2.040
(7) Diffusion coefficients	
DSOL - diffusion coefficient of soluble (m ² /sec)	1.08E-08
DPAR - diffusion coefficient of particulate (m ² /sec)	6.90E-10
(8) Radioactivity parameters	
ALPH1 - cobalt-60 production rate in core (Co-60 Ci/kg-Fe.day.%power)	2.80E-03
ALPH2 - cobalt-58 production rate in core (Co-58 Ci/kg-Fe.day.%power)	8.40E-02
LAMD1 - decay constant of cobalt-60 (day ⁻¹)	3.60E-04
LAMD2 - decay constant of cobalt-58 (day ⁻¹)	9.78E-03
(9) Recoil release	
RR58 - fractional recoil release of cobalt-58 produced by (n,p)	2.50E-01
RR60 - fractional recoil release of cobalt-60 produced by (n,p)	0
(10) Crystal growth and dissolution	
HCRYSC - crystal growth coefficient of corrosion product in core (m/sec)	6.00E-05
HCRYSA - crystal growth coefficient of activity in S/G (m/sec)	6.00E-06
HDISSC - dissolution coefficient of corrosion product in S/G (m/sec)	6.00E-05
HDISSA - dissolution coefficient of activity in core (m/sec)	6.00E-06
(11) Other parameters	
CR - corrosion rate of S/G tube(kg/day)	4.90E-02

제2절 원자로 압력용기 방사화

기기 방사화 평가대상은 고리 1 호기 원자로 압력용기의 주요재질인 SA508 합금강을 선정하였으며 평가주기(운전기간)를 누적으로 하는 중성자 Flux에 의한 방사화 계산결과를 도출하였다. 원자로 압력용기의 방사화 계산을 위한 평가일수는 표 16과 같이 고리 1 호기의 34 주기 운전일수를 활용하였다.

표 16. 고리 1 호기 주기별 운전기간[25]

주기	운전시작일	유지보수 시작일	유지보수 종료일	운전기간
1	1978/04/29	1978/10/24	1979/01/02	178
2	1979/01/02	1979/10/27	1980/01/12	298
3	1980/01/12	1981/01/30	1981/05/10	384
4	1981/05/10	1982/04/17	1982/06/29	342
5	1982/06/29	1983/04/07	1983/06/04	282
6	1983/06/04	1984/07/08	1984/10/05	400
7	1984/10/05	1985/08/14	1985/11/01	313
8	1985/11/01	1986/10/11	1986/12/15	344
9	1986/12/15	1988/01/15	1988/07/11	396
10	1988/07/11	1989/03/28	1989/07/12	260
11	1989/07/12	1990/10/19	1991/01/14	464
12	1991/01/14	1991/12/31	1992/03/13	351
13	1992/03/13	1993/05/01	1993/07/06	414
14	1993/07/06	1994/07/15	1994/09/13	374
15	1994/09/13	1996/01/14	1996/03/31	488
16	1996/03/31	1997/03/30	1997/06/08	364
17	1997/06/08	1998/06/19	1998/09/06	376
18	1998/09/06	1999/09/05	1999/10/29	364
19	1999/10/29	2000/10/15	2000/11/18	352
20	2000/11/18	2001/11/16	2001/12/12	363
21	2001/12/12	2003/01/29	2003/02/28	413
22	2003/02/28	2004/02/26	2004/03/21	363
23	2004/03/21	2005/03/08	2005/05/10	352
24	2005/05/10	2006/05/05	2006/06/10	360
25	2006/06/10	2007/06/09	2008/01/09	364

26	2008/01/09	2008/11/20	2008/12/09	316
27	2008/12/09	2009/12/16	2010/01/08	372
28	2010/01/08	2011/01/13	2011/02/01	370
29	2011/02/01	2012/02/01	2012/03/01	365
30	2012/03/01	2013/04/12	2013/10/05	407
31	2013/10/05	2014/02/25	2014/04/17	143
32	2014/04/17	2015/04/25	2015/06/07	373
33	2015/06/07	2016/06/23	2016/07/30	382
34	2016/07/30	2017/06/18	-	323

평가코드 반응단면적은 ORIGEN2 코드에 내장되어있는 핵반응단면적 및 중성자 스펙트럼 계산 관련 라이브러리를 활용하였으며, 원자로 압력용기 방사화선원항 계산에서의 주요인자로 분류되는 중성자 Flux는 MCNP를 활용한 고리 1 호기 원전 방사화구조물 계산 데이터를 활용하였다[33].

중성자 Flux 계산을 위한 대표주기 선정은 보수적인 결과도출을 위해 가장 높은 중성자 Flux를 갖는 4 주기 데이터를 ORIGEN2 코드에서 활용하였으며, 평가입력 인자는 다음 표 17과 같다.

표 17. ORIGEN2 평가를 위한 주요 입력인자

Command keyword	Description
RDA	FLUX = 4.74E+11, IRRADIATION DAY = 34 cycles
	CROSS SECTION LIBRARY = PWRU
	DECAY LIB, XSECT LIB, VAR. XSECT, PHOTON LIB etc.
OPTL	6*8 5 17*8
OPTA	
OPTF	
BAS	SA 508 346 ton

제3절 크러드 및 방사화선원항을 고려한 선량평가

선량평가를 위한 모델링을 위해 고리 1 호기의 제원관련 참고문헌을 활용하였다. 노심지지 배럴은 반지름(내경) 141.5 cm, 반지름(외경) 144 cm, 높이 366 cm, 두께 2.5 cm을 제원으로 원기둥 형태로 입력 자료를 구축하였다. 원자로압력용기를 모델링하기 위해 반지름(내경) 163 cm, 반지름(외경) 180 cm, 높이 1,300 cm, 두께 17 cm, 원기둥과 상단 및 하단에 반지름 180 cm의 반구를 모델링하였다[34, 35, 36].

위 제원을 기반으로 PHITS 코드에서의 T-Volume 모듈을 활용하여 노심지지 배럴 및 원자로 압력용기의 체적을 도출하였으며, 노심지지 배럴에서의 크러드 선원항은 CRUDTRAN에서 도출된 Co-60 선원항과 원자로 압력용기에서의 방사화재고량은 ORIGEN2에서 도출된 Co-60 선원항을 입력데이터로 활용하였다. 이와 관련하여 본 연구에서 사용한 시점(주기 종료시점, 해체 예상시점)에 대한 선원항 입력 데이터는 표 18에 나타내었다.

표 18. 제염계수를 고려한 선원항 입력자료

노심지지 배럴(Bq)			원자로 압력용기(Bq)	
계통제염	주기 종료시점	해체 예상시점	주기 종료시점	해체 예상시점
DF(1)	2.05E+12	8.17E+11	3.70E+11	1.48E+11
DF(5)	4.10E+11	1.63E+11		
DF(10)	2.05E+11	8.17E+10		
DF(15)	1.37E+11	5.46E+10		
DF(20)	1.03E+11	4.10E+10		
DF(25)	8.20E+10	3.27E+10		
DF(30)	6.83E+10	2.72E+10		
DF(35)	5.86E+10	2.33E+10		
DF(40)	5.13E+10	2.04E+10		
DF(45)	4.56E+10	1.82E+10		
DF(50)	4.10E+10	1.63E+10		

제4장 평가결과 및 논의

제1절 크러드 선원항 평가

원전해체 시 크러드에서 기인하는 해체작업자의 선량평가를 도출하기 위한 목적으로 CRUDTRAN 코드를 활용하여 국내 고리 1호기 운전이력 및 설계 자료 등을 검토하여 입력인자를 구축한 후 전주기에 대해 노심지지 배럴과 증기발생기에서의 크러드 생성량 및 Co-60 선원항을 평가하였다. 평가결과는 표면오염으로서 면적당 방사능으로 도출되었으므로 면적을 고려하여 단위환산을 수행하였다. 평가결과 주기 종료시점에서의 노심지지 배럴 내 크러드 선원항은 $2.05E+12$ Bq으로 도출되었으며, 전주기에 대한 결과 값은 부록 I에 요약하여 제시하였다.

그림 4~5 에서의 크러드 생성량 및 선원항 평가결과를 보면 S/G에서는 주기별 운전에 따라 선형적으로 침적되는 반면에 Core에서는 입력자료(온도)에 따른 침적과 용해가 반복되며, 주기별 운영 중 예방정비기간에 따른 반감기가 고려되어 증가와 감소가 반복되어 누적되는 것을 확인하였다.

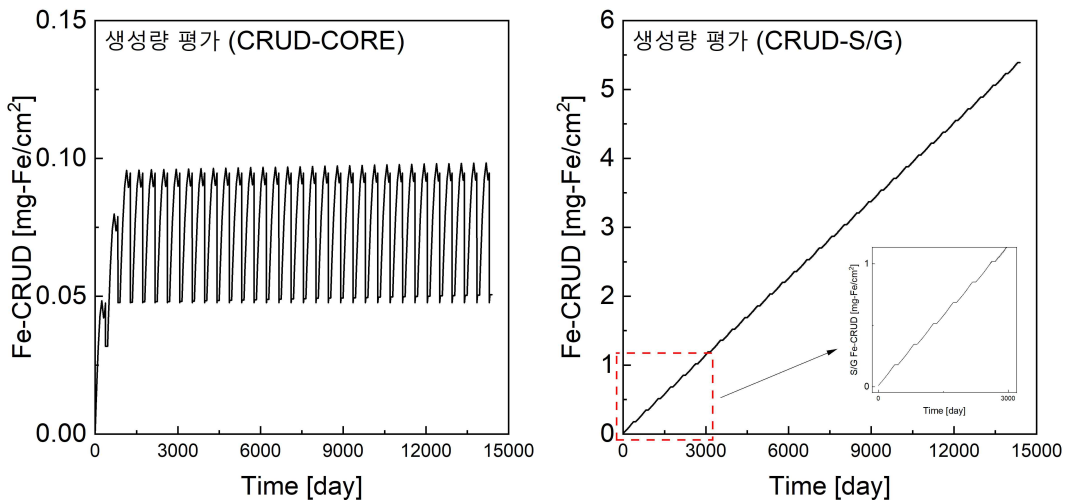


그림 5 Core 및 S/G에서의 크러드 생성량 평가결과(mg-Fe/cm²)

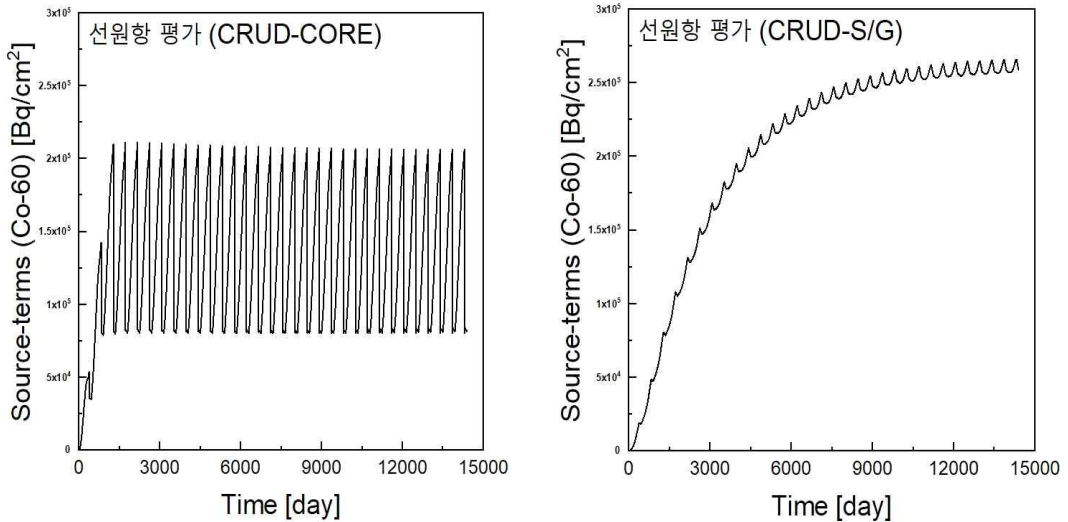


그림 6. Core 및 S/G에서의 크러드 선원항 평가결과(Bq/cm²)

크러드 침적량에 대한 평가결과는 매우 적은 양지만 선형적으로 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 이유는 두 가지 요인으로 인한 차이로 판단하였다. 첫째, 평가코드를 구동하기 위한 입력 자료로서 Boron과 LiOH의 농도와 연관이 있는 것 판단된다. 실제 원전에서도 크러드 및 방사화농도는 수화학조건, 붕산농도, LiOH의 농도, 용존 수소의 농도 등을 변화하여 크러드 및 방사화 농도의 생성량을 최소화 할 수 있는 pH를 활용하여 최적의 운전조건으로 부식생성물의 생성을 최소화 하고 있다. 그러므로 pH가 증가할수록 노심 및 증기발생기 사이의 용해도차가 증가하여 침전되는 양이 줄어들게 된다. 실제 구동 입력인자로서 Boron과 LiOH의 농도는 고리 1호기 최적 운전조건에서의 데이터를 활용하여 평가를 위한 입력 자료로서 사용하였기 때문에 생성되는 크러드양의 변화가 크지 않는 것으로 판단된다. 두 번째, 평가코드에서는 크러드 생성에 대해 증기발생기 및 노심에서의 경계층에 걸친 온도차로 인하여 생성되는 메커니즘을 갖고 있다. 결과적으로 노심에서의 크러드 변화가 거의 없는 이유는 경계층에 걸친 온도차가 적기 때문에 크러드 양이 매우 미미하게 증가하는 것으로 판단된다.

제2절 원자로 압력용기 방사화 평가

노심 외 영역(continuous cross-section library)을 고려한 평가방법으로 도출된 중성자 Flux을 ORIGEN2에서의 입력자료로 활용하였다. 고리 1 호기 압력용기의 전주기 주기 종료시점 및 해체 예상시점에서의 주기별 방사화 선원량은 표 19~20과 같으며 그림 7 ~ 11로 나타내었다. 주요 방사화핵종인 Co-60, Fe-55, Nb-94, Ni-59, Ni-63의 주기별 누적 선원량 평가결과는 부록 II 에 제시하였다.

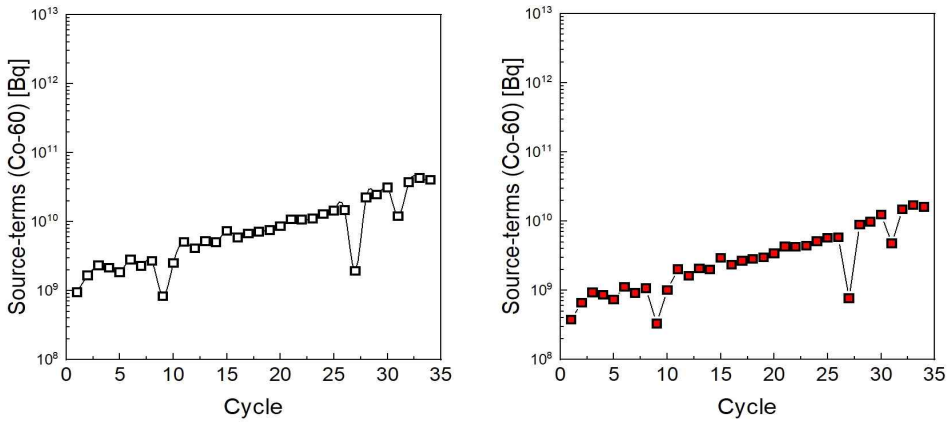


그림 7. Co-60 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)

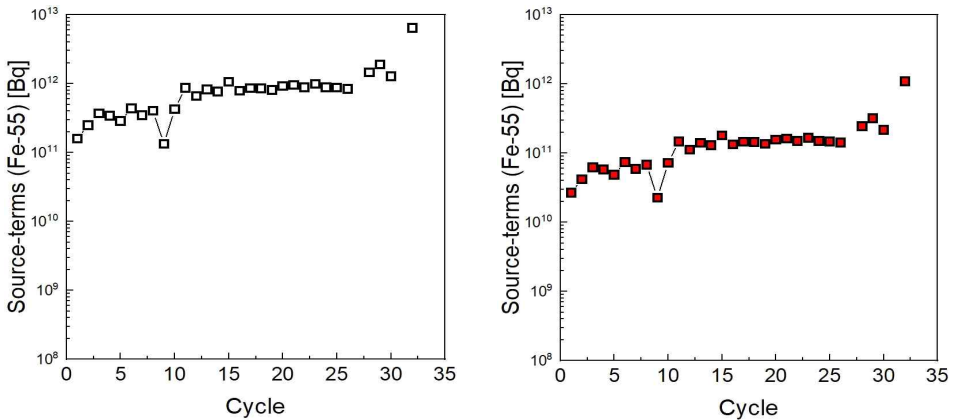


그림 8. Fe-55 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)

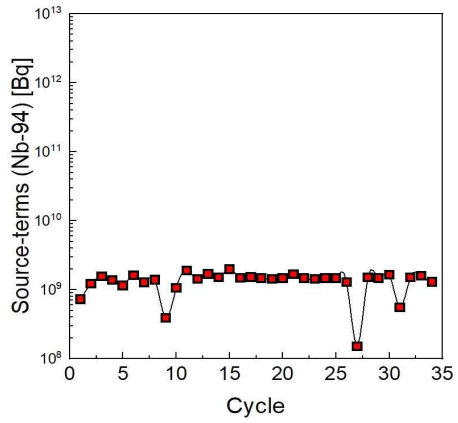
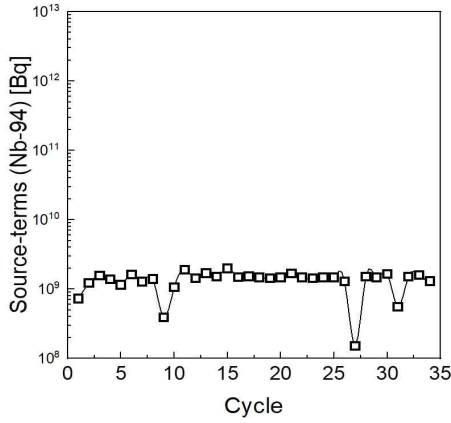


그림 9 Nb-94 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)

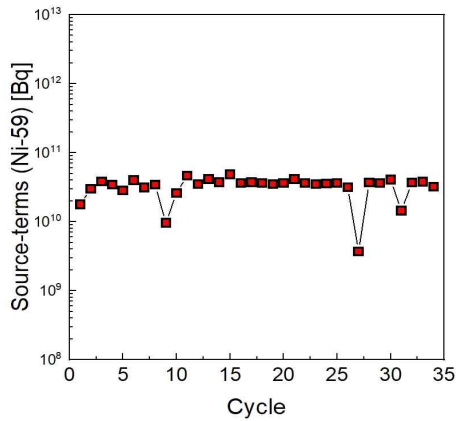
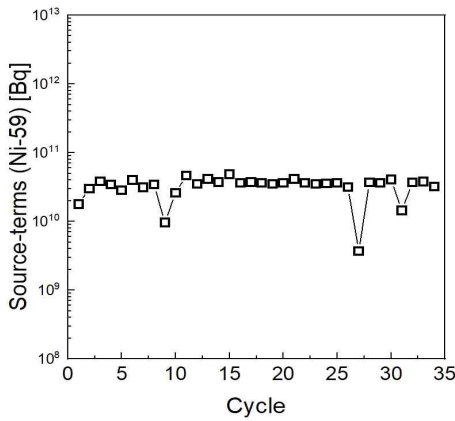


그림 10. Ni-59 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)

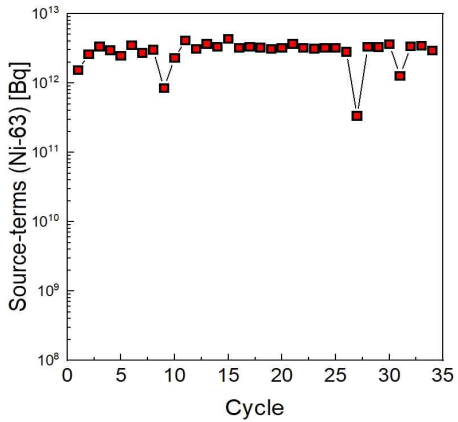
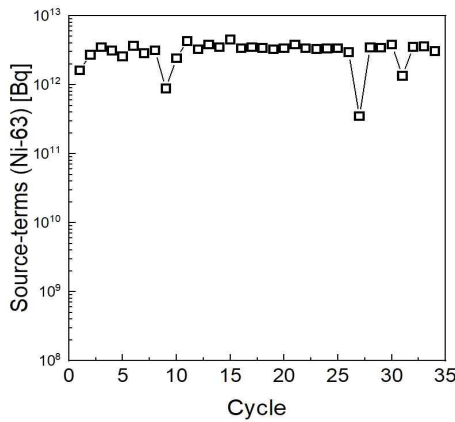


그림 11. Ni-63 방사화 평가결과(좌: 주기 종료시점, 우: 해체 예상시점)

표 19. 주요 핵종 방사화 계산결과(주기 종료시점)

주기	운전 일수	Co-60 [Bq]	Nb-94 [Bq]	Fe-55 [Bq]	Ni-59 [Bq]	Ni-63 [Bq]
1	178	9.51E+08	7.26E+08	1.59E+11	1.79E+10	1.62E+12
2	298	1.67E+09	1.22E+09	2.49E+11	2.99E+10	2.72E+12
3	384	2.33E+09	1.57E+09	3.68E+11	3.85E+10	3.51E+12
4	342	2.16E+09	1.39E+09	3.42E+11	3.43E+10	3.13E+12
5	282	1.85E+09	1.15E+09	2.86E+11	2.83E+10	2.58E+12
6	400	2.81E+09	1.63E+09	4.37E+11	4.01E+10	3.67E+12
7	313	2.29E+09	1.28E+09	3.48E+11	3.14E+10	2.87E+12
8	344	2.69E+09	1.40E+09	4.03E+11	3.45E+10	3.16E+12
9	96	8.34E+08	3.92E+08	1.33E+11	9.62E+09	8.85E+11
10	260	2.52E+09	1.06E+09	4.26E+11	2.60E+10	2.41E+12
11	464	5.06E+09	1.89E+09	8.67E+11	4.65E+10	4.30E+12
12	351	4.10E+09	1.43E+09	6.63E+11	3.52E+10	3.26E+12
13	414	5.21E+09	1.69E+09	8.25E+11	4.14E+10	3.85E+12
14	374	5.05E+09	1.52E+09	7.69E+11	3.74E+10	3.51E+12
15	488	7.39E+09	1.99E+09	1.06E+12	4.88E+10	4.53E+12
16	364	5.91E+09	1.49E+09	7.86E+11	3.66E+10	3.38E+12
17	376	6.73E+09	1.53E+09	8.63E+11	3.74E+10	3.50E+12
18	364	7.17E+09	1.48E+09	8.51E+11	3.66E+10	3.40E+12
19	352	7.56E+09	1.43E+09	8.06E+11	3.51E+10	3.26E+12
20	363	8.58E+09	1.48E+09	9.20E+11	3.63E+10	3.39E+12
21	413	1.08E+10	1.68E+09	9.60E+11	4.14E+10	3.85E+12
22	363	1.07E+10	1.48E+09	8.83E+11	3.63E+10	3.38E+12
23	352	1.11E+10	1.43E+09	9.83E+11	3.51E+10	3.30E+12
24	360	1.29E+10	1.47E+09	8.79E+11	3.59E+10	3.36E+12
25	364	1.45E+10	1.48E+09	8.71E+11	3.63E+10	3.38E+12
26	316	1.47E+10	1.29E+09	8.39E+11	3.18E+10	2.96E+12
27	37	1.93E+09	1.52E+08	-	3.70E+09	3.51E+11
28	370	2.24E+10	1.52E+09	1.45E+12	3.70E+10	3.47E+12
29	365	2.46E+10	1.48E+09	1.89E+12	3.63E+10	3.46E+12
30	407	3.14E+10	1.66E+09	1.28E+12	4.07E+10	3.81E+12
31	143	1.20E+10	5.55E+08	-	1.44E+10	1.34E+12
32	373	3.74E+10	1.52E+09	6.43E+12	3.70E+10	3.54E+12
33	382	4.29E+10	1.59E+09	-	3.81E+10	3.60E+12
34	323	4.03E+10	1.30E+09	-	3.22E+10	3.07E+12

표 20. 주요 핵종 방사화 계산결과(해체 예상시점)

주기	운전 일수	Co-60 [Bq]	Nb-94 [Bq]	Fe-55 [Bq]	Ni-59 [Bq]	Ni-63 [Bq]
1	178	3.79E+08	7.26E+08	2.68E+10	1.79E+10	1.54E+12
2	298	6.64E+08	1.22E+09	4.21E+10	2.99E+10	2.59E+12
3	384	9.30E+08	1.57E+09	6.22E+10	3.85E+10	3.35E+12
4	342	8.62E+08	1.39E+09	5.78E+10	3.43E+10	2.98E+12
5	282	7.38E+08	1.15E+09	4.85E+10	2.83E+10	2.46E+12
6	400	1.12E+09	1.63E+09	7.39E+10	4.01E+10	3.49E+12
7	313	9.14E+08	1.27E+09	5.89E+10	3.14E+10	2.73E+12
8	344	1.07E+09	1.40E+09	6.82E+10	3.45E+10	3.01E+12
9	96	3.32E+08	3.92E+08	2.25E+10	9.62E+09	8.43E+11
10	260	1.01E+09	1.06E+09	7.22E+10	2.60E+10	2.29E+12
11	464	2.02E+09	1.89E+09	1.47E+11	4.65E+10	4.09E+12
12	351	1.63E+09	1.43E+09	1.12E+11	3.52E+10	3.11E+12
13	414	2.07E+09	1.69E+09	1.40E+11	4.14E+10	3.67E+12
14	374	2.01E+09	1.52E+09	1.30E+11	3.74E+10	3.34E+12
15	488	2.94E+09	1.99E+09	1.80E+11	4.88E+10	4.32E+12
16	364	2.35E+09	1.49E+09	1.33E+11	3.66E+10	3.22E+12
17	376	2.68E+09	1.53E+09	1.46E+11	3.74E+10	3.34E+12
18	364	2.86E+09	1.48E+09	1.44E+11	3.66E+10	3.24E+12
19	352	3.01E+09	1.43E+09	1.36E+11	3.51E+10	3.11E+12
20	363	3.42E+09	1.48E+09	1.56E+11	3.63E+10	3.23E+12
21	413	4.31E+09	1.68E+09	1.63E+11	4.14E+10	3.67E+12
22	363	4.25E+09	1.48E+09	1.49E+11	3.63E+10	3.22E+12
23	352	4.43E+09	1.43E+09	1.66E+11	3.51E+10	3.14E+12
24	360	5.12E+09	1.47E+09	1.49E+11	3.59E+10	3.20E+12
25	364	5.76E+09	1.48E+09	1.47E+11	3.63E+10	3.22E+12
26	316	5.87E+09	1.29E+09	1.42E+11	3.18E+10	2.82E+12
27	37	7.69E+08	1.52E+08	-	3.70E+09	3.35E+11
28	370	8.93E+09	1.52E+09	2.45E+11	3.70E+10	3.31E+12
29	365	9.81E+09	1.48E+09	3.20E+11	3.63E+10	3.30E+12
30	407	1.25E+10	1.66E+09	2.17E+11	4.07E+10	3.63E+12
31	143	4.77E+09	5.55E+08	-	1.44E+10	1.27E+12
32	373	1.49E+10	1.52E+09	1.09E+12	3.70E+10	3.37E+12
33	382	1.71E+10	1.59E+09	-	3.81E+10	3.43E+12
34	323	1.61E+10	1.29E+09	-	3.22E+10	2.93E+12

그림 12에서는 주기별 및 누적평가에 대해 5가지 주요핵종의 선원항 결과를 비교하여 나타내었다.

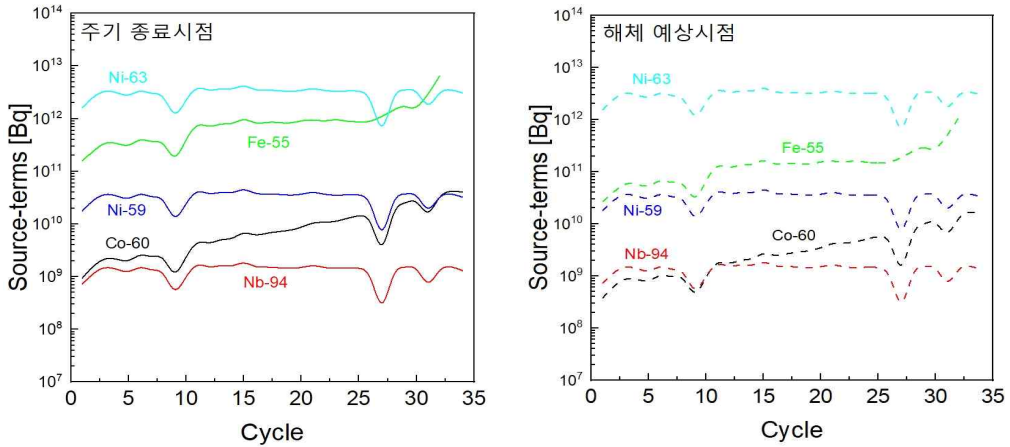


그림 12. 원자로 압력용기에서의 주요 핵종 방사화 계산결과 비교

본 논문에서 도출된 방사화선원항 결과데이터를 기반으로 선량평가에서는 피폭평가 시 가장 많은 영향을 미치는 주요 감마핵종인 Co-60의 선원항을 입력자료로 활용하였다. 원자로 압력용기에서의 Co-60에 대한 누적된 방사화 평가는 표 21과 같이 주기 종료시점에는 $3.70E+11$ Bq로 평가되었으며, 해체 예상시점에는 $1.48E+11$ Bq로 도출되었다. 이 결과는 압력용기 외부(표면)에서의 작업자 선량평가 도출을 위한 방사화선원항의 입력 자료로 활용하였다. 표 21은 주기별 운전종료일에 따른 운전일수 및 해체 예상시점의 경과일수를 고려한 평가결과를 나타내고 있다.

표 21. Co-60 방사화 계산결과(주기 종료시점, 해체 예상시점)

주기	운전 일수	해체 예상시점 경과일	주기별 종료시점 방사능(Bq)	누적_주기별 종료시점 방사능(Bq)	주기별 해체 예상시점 방사능(Bq)	누적_주기별 해체 예상시점 방사능(Bq)
1	178	16,673	9.51E+08	9.51E+08	3.79E+08	3.79E+08
2	298	16,305	1.67E+09	2.62E+09	6.64E+08	1.04E+09
3	384	15,844	2.33E+09	4.95E+09	9.30E+08	1.97E+09
4	342	15,402	2.16E+09	7.11E+09	8.62E+08	2.83E+09
5	282	15,047	1.85E+09	8.96E+09	7.38E+08	3.57E+09
6	400	14,589	2.81E+09	1.18E+10	1.12E+09	4.69E+09
7	313	14,187	2.29E+09	1.41E+10	9.14E+08	5.60E+09
8	344	13,764	2.69E+09	1.68E+10	1.07E+09	6.68E+09
9	96	13,303	8.34E+08	1.76E+10	3.32E+08	7.01E+09
10	260	12,865	2.52E+09	2.01E+10	1.01E+09	8.01E+09
11	464	12,295	5.06E+09	2.52E+10	2.02E+09	1.00E+10
12	351	11,857	4.10E+09	2.93E+10	1.63E+09	1.17E+10
13	414	11,370	5.21E+09	3.45E+10	2.07E+09	1.37E+10
14	374	10,930	5.05E+09	3.95E+10	2.01E+09	1.57E+10
15	488	10,382	7.39E+09	4.69E+10	2.94E+09	1.87E+10
16	364	9,941	5.91E+09	5.28E+10	2.35E+09	2.10E+10
17	376	9,495	6.73E+09	5.96E+10	2.68E+09	2.37E+10
18	364	9,052	7.17E+09	6.67E+10	2.86E+09	2.66E+10
19	352	8,646	7.56E+09	7.43E+10	3.01E+09	2.96E+10
20	363	8,249	8.58E+09	8.29E+10	3.42E+09	3.30E+10
21	413	7,810	1.08E+10	9.37E+10	4.31E+09	3.73E+10
22	363	7,417	1.07E+10	1.04E+11	4.25E+09	4.16E+10
23	352	7,041	1.11E+10	1.15E+11	4.43E+09	4.60E+10
24	360	6,618	1.29E+10	1.28E+11	5.12E+09	5.11E+10
25	364	6,218	1.45E+10	1.43E+11	5.76E+09	5.69E+10
26	316	5,688	1.47E+10	1.58E+11	5.87E+09	6.28E+10
27	37	5,297	1.93E+09	1.59E+11	7.69E+08	6.35E+10
28	370	4,904	2.24E+10	1.82E+11	8.93E+09	7.25E+10
29	365	4,520	2.46E+10	2.06E+11	9.81E+09	8.23E+10
30	407	4,084	3.14E+10	2.38E+11	1.25E+10	9.48E+10
31	143	3,765	1.20E+10	2.50E+11	4.77E+09	9.96E+10
32	373	3,341	3.74E+10	2.87E+11	1.49E+10	1.14E+11
33	382	2,916	4.29E+10	3.30E+11	1.71E+10	1.32E+11
34	323	2,556	4.03E+10	3.70E+11	1.61E+10	1.48E+11

그림 13에서는 주기 종료시점 및 해체 예상시점에서의 누적 방사화선원량과 주기별 선원량 결과를 비교하기 위하여 그림으로 나타내었다.

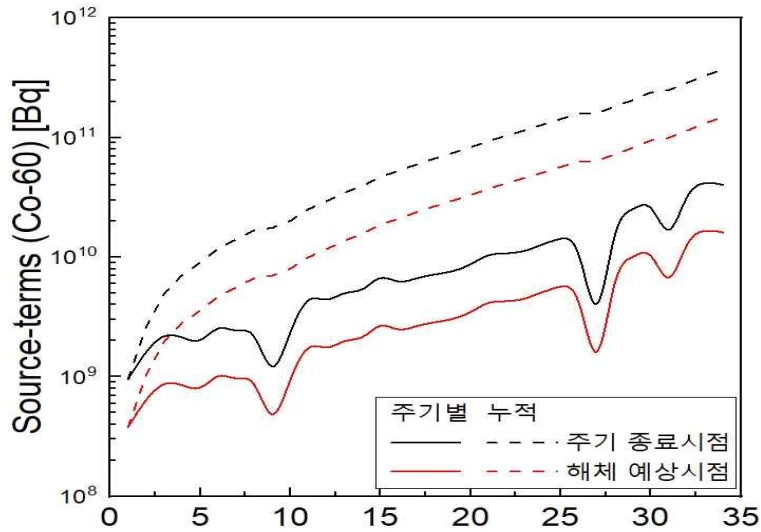


그림 13. 시점에 따른 누적 및 주기별 Co-60 선원항 비교

그림 14 ~ 15에서는 누적 방사화 선원항과 주기별 선원항의 결과를 주기 종료시점과 해체 예상시점으로 각각 나누어 그림으로 나타내었다.

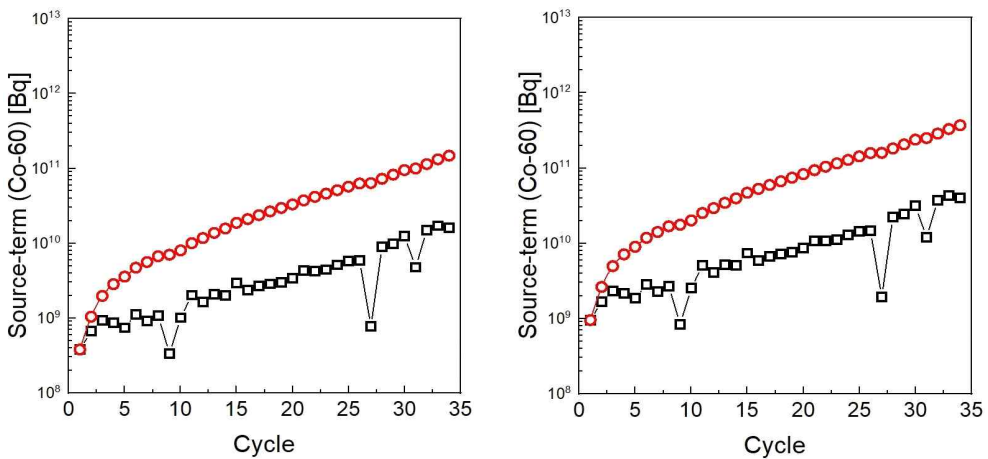


그림 14. 주기 종료시점 및 해체 예상시점에서의 Co-60 방사화 선원항

제3절 크러드 및 방사화를 고려한 선량 평가

선량평가를 위해 몬테카를로 코드인 PHITS를 활용하여 노심지지 배럴 내 크러드 선원향과 원자로 압력용기 방사화선원향을 활용하여 압력용기 표면 1m 거리에서의 개인 선량평가를 도출하였다. 선량평가 결과를 도출하기 위해 크러드 및 방사화선원향은 Co-60만을 평가대상으로 고려하였다.

주기 종료시점에서의 노심지지 배럴 내 크러드에서 기인하는 결과는 $5.94E-02$ mSv/h, 원자로 압력용기 방사화로부터 기인하는 결과는 $5.08E-04$ mSv/h, 해체 예상시점에서의 노심지지 배럴 내 크러드에서 기인하는 결과는 $2.37E-02$ mSv/h, 원자로 압력용기 방사화로부터 기인하는 결과는 $2.03E-04$ mSv/h로 도출되었다. 추가적으로 선량평가 시 전계통제염으로 인한 크러드 선원향의 제거를 고려하기 위하여 제염계수를(1~50)까지 고려하여 예상되는 시간당 선량평가를 도출하였으며 결과데이터는 부록 III에 나타내었다. 해체 시점에서는 선량평가를 비교한 결과 크러드로부터 기인하는 평가결과가 방사화된 압력용기에 의한 선량평가보다 높은 것을 확인하였다.

일반적으로 작업자 피폭선량을 낮추기 위한 방법은 작업방법(시간, 거리 등)을 고려하는 방법과 작업 시나리오(환경)를 고려하는 방법들이 있다. 작업 시나리오를 설정하고 이에 따른 작업방법 등을 고려하는 연구는 추후 본 연구에서의 평가방법을 활용한 연구를 기반으로 후속연구로서의 의미가 크다고 판단하였다. 그러므로 본 논문에서는 1m 거리에서의 유효선량(피폭선량)을 평가하기 위한 변수로 노심지지 배럴에서의 크러드 선원향은 제염계수를 적용하는 방법을 적용하였다.

그림 16 ~ 17에서의 평가결과는 주기 종료시점 및 해체예상시점에서의 작업자 피폭선량(유효선량) 평가결과를 나타내고 있다. 연간 2,000 시간의 작업량을 고려할 경우의 선량평가 결과를 보면 전계통제염을 수행하지 않을 경우에는 작업종사자 및 일반인의 피폭관리를 위한 연간 유효선량이 넘는 것으로 확인되었다. 주기 종료시점에서의 노심지지 배럴로부터 기인되는 작업종사자 피폭관리 수준의 연간 유효선량을 만족하기 위해서는 DF(10), 해체 예상시점에서는 DF(5) 이상을 달성하는 제염을 수행해야한다. 규정상의 비교군으로서 해체 예상시점에서의 노심지지 배럴로부터 기인되는 선량평가에 대해 일반인 수준의 피폭관리를 위한 연간 유효선량을 만족하기 위해서는 DF(50) 이상을 달성해야한다.

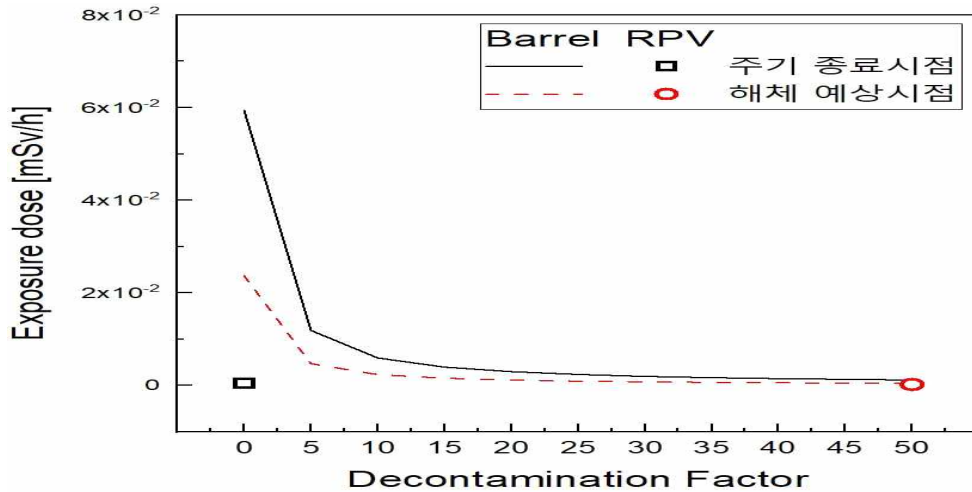


그림 15. 노심지지 배럴 및 원자로 압력용기에서 기인하는 선량 평가결과(시간)

표 22. 크러드 및 방사화선원향을 고려한 선량평가 결과(시간)

계통제염	노심지지 배럴[mSv/h]		원자로 압력용기[mSv/h]	
	주기 종료시점	해체 예상시점	주기 종료시점	해체 예상시점
DF(1)	5.94E-02	2.37E-02	5.08E-04	2.03E-04
DF(5)	1.19E-02	4.72E-03		
DF(10)	5.94E-03	2.37E-03		
DF(15)	3.97E-03	1.58E-03		
DF(20)	2.98E-03	1.19E-03		
DF(25)	2.37E-03	9.47E-04		
DF(30)	1.98E-03	7.88E-04		
DF(35)	1.70E-03	6.75E-04		
DF(40)	1.49E-03	5.91E-04		
DF(45)	1.32E-03	5.27E-04		
DF(50)	1.19E-03	4.72E-04		

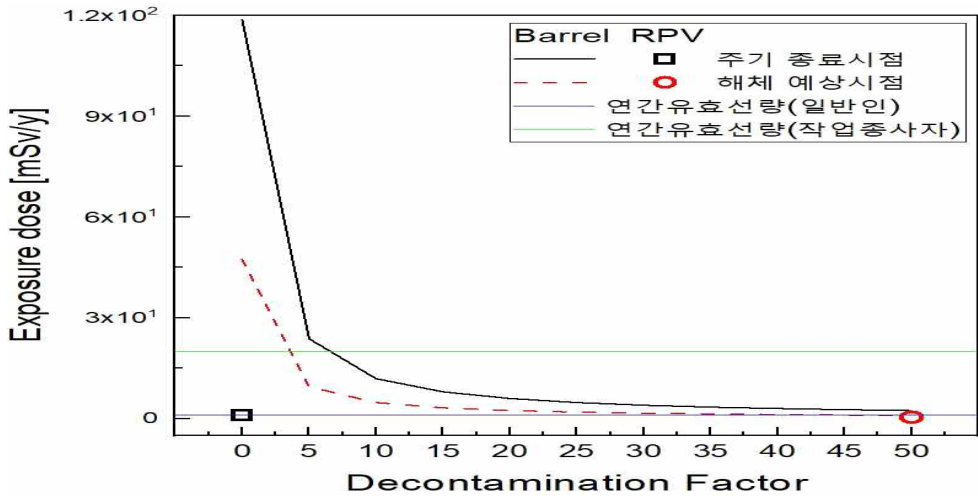


그림 16. 노심지지 배럴 및 원자로 압력용기에서 기인하는 선량 평가결과(연간)

표 23. 크러드 및 방사화선원향을 고려한 선량평가 결과(연간)

노심지지 배럴[mSv/y]			원자로 압력용기[mSv/y]	
계통제염	주간 종료시점	해체 예상시점	주간 종료시점	해체 예상시점
DF(1)	1.19E+02	4.73E+01	1.02E+00	4.06E-01
DF(5)	2.37E+01	9.44E+00		
DF(10)	1.19E+01	4.73E+00		
DF(15)	7.94E+00	3.16E+00		
DF(20)	5.97E+00	2.37E+00		
DF(25)	4.75E+00	1.89E+00		
DF(30)	3.96E+00	1.58E+00		
DF(35)	3.39E+00	1.35E+00		
DF(40)	2.97E+00	1.18E+00		
DF(45)	2.64E+00	1.05E+00		
DF(50)	2.37E+00	9.44E-01		

제5장 결론

본 논문에서는 국내 고리 1 호기 원전의 해체 작업자 피폭관리 관점에서의 크러드의 중요성을 부각시키고자 크러드 및 방사화선원향을 도출하고, 이를 포함한 작업자 선량평가를 수행하였다. 본 논문에서 제시하는 통합 평가체계는 증기발생기와 같은 큰 오염면적 및 높은 선량률을 갖는 계통이나 기기에 대해 충분히 활용가능하며 연구의 확장성 측면에서 활용가치가 있을 것으로 판단된다.

기존의 크러드에서 규명된 화합물형태 외에도 다양한 화합물형태를 고려한 최적의 제염기술 선정의 필요성을 제시하였다. 또한 원자로 내 핵연료에서의 중성자 방사화로 인한 주요 방사화구조물은 영구정지 직후 알파선, 베타선, 감마선 등을 방출하는 수많은 핵종이 존재하지만 해체폐기물 내 수많은 핵종을 평가대상으로 고려하는 것은 본 논문에서의 크러드 및 방사화선원향을 고려한 작업자 선량평가를 도출하기 위한 목적으로는 타당하지 않는 것으로 판단하였다. 그러므로 본 논문에서는 해체 시점에서의 작업자 선량평가를 도출하기 위해 크러드 선원향에서의 주요핵종 선정방법론을 수립하였다. 최종적으로 선정된 Co-60은 고에너지 감마선을 방출하는 핵종으로 해체작업자 피폭저감에 큰 영향을 미치는 주요 핵종이다.

원전해체 시 크러드로부터 기인하는 해체작업자의 선량평가를 도출하기 위해 CRUDTRAN 코드를 활용하여 노심에서의 Co-60 선원향을 평가하였으며 노심지지 배럴에서의 선원향으로 간주하였다. 방사화선원향은 MCNP/ORIGEN2를 활용하여 원자로 압력용기에서의 Co-60, Fe-55, Nb-94, Ni-59, Ni-63의 선원향을 도출하였으며 선량평가를 위한 입력 자료로는 고에너지 대표핵종인 Co-60을 활용하였다.

고리 1 호기의 전주기(34 주기) 운전을 대상으로 노심지지 배럴 내 크러드의 선원향은 주기 종료시점에는 $2.05E+12$ Bq, 해체 예상시점에는 $8.17E+11$ Bq로 평가되었다. 계산값과 측정값과의 비교를 수행하기 위하여 참고자료를 조사한 결과 계통 내 존재하는 크러드의 비방사능 데이터를 확보할 수 있었다. 비교를 위해 본 논문에서 도출된 노심지지 배럴 내 크러드의 선원향과 크러드의 발생량에 대해 면적을 고려하여 단위환산을 통한 비방사능값을 도출하였다. 국내 원전을 대상으로 연구된 측정결과와 미국 NRC에서 제시하는 원자력발전소(6기)에서의 측정데이터를 비교한 결과 Co-60에 대한 비방사능 농도는 NRC에서는 최대평균값 $4.42E+08$ Bq/g, 국내

원전에서 연구된 최대평균값은 $3.88E+08$ Bq/g 이며, 본 논문에서의 결과 값에서는 $1.61E+09$ Bq/g 로 도출되었다. 평가코드를 활용한 결과가 기존의 연구 결과 값과 비교했을 때 약간의 보수성을 띄는 것으로 확인되었다. 비교군으로 조사된 미국 NRC 및 국내 원전에서 제시하는 데이터의 경우 고리 1 호기와는 다른 노형의 발전소 데이터이므로 출력 및 운전기간 등의 상이함으로 인해 차이가 보이는 것으로 판단되며, 본 논문에서 도출된 크러드의 Co-60 비방사능 결과 값은 고리 1 호기의 특성을 고려한 일부 입력 자료에 대해서 적용한 결과이므로 추후 정확도 높은 결과가 도출되기 위해서는 평가대상 원전에 대한 고유 입력 자료의 추가 확보가 필요하다.

원자로 압력용기에서의 방사화 핵종재고량 평가를 위해 고리 1 호기(4 주기)에서의 보정된 중성자 Flux 데이터를 활용하였다. 원자로 압력용기의 방사화 선원항 평가는 주기 종료시점에는 $3.70E+11$ Bq 로 평가되었으며, 해체 예상시점에는 $1.48E+11$ Bq 로 평가되었다.

최종적으로 본 논문에서는 해체시점에서의 크러드의 중요성을 연구하기 위하여 크러드의 선원항 및 방사화선원항을 고려한 압력용기 표면으로부터 1 m 거리에서의 작업자에게 미치는 피폭영향을 평가하였으며, 제염계수를 고려한 유효선량을 도출하였다. 주기 종료시점에서의 노심지지 배럴 내 크러드에서 기인하는 결과는 $5.94E-02$ mSv/h, 원자로 압력용기 방사화로부터 기인하는 결과는 $5.08E-04$ mSv/h, 예상 해체 예상시점에서의 노심지지 배럴 내 크러드에서 기인하는 결과는 $2.37E-02$ mSv/h, 원자로 압력용기 방사화로부터 기인하는 결과는 $2.03E-04$ mSv/h 로 도출되었다. 제염계수를 고려하지 않을 경우 크러드에서 기인하는 선량평가의 결과값이 기기방사화로 인한 원자로 압력용기에서 기인하는 선량평가 결과보다 높음을 확인하였다. 단, 해체시점에서는 노심지지 배럴에서의 전계통제염을 통한 제염계수가 50 이상을 만족할 경우에는 크러드 및 압력용기 방사화로 인한 선량평가가 유사하게 됨을 확인하였다.

본 논문에서 도출된 결과는 크러드에 존재 가능한 핵종의 화합물 거동을 평가한 기초자료로서 평가결과는 프로그램을 활용한 결과이므로 추후 해체 시 발생되는 크러드의 분석데이터를 반영한 평가결과와의 비교는 필요하다. 이러한 결과는

향후 계통제염을 위한 기술선정에 있어 잠재적인 위험을 줄이는데 의미가 있을 것으로 판단된다.

제염계수가 다양하게 고려된 선원항 및 선량 평가결과는 향후 본격적인 해체 시, 작업자 피폭관리에 대한 사전 연구로서 작업시점에 따른 작업자 피폭관리에 대한 근거자료로써 활용될 수 있을 것이다. 실제 해체 시 확보된 분석결과와 본 논문에서의 결과에 대해 비교/분석을 통한 추가연구를 수행한다면 국내에서 운영 중인 원전 및 해체가 준비 중인 원전에 적용할 수 있는 타당성을 확보할 수 있으며 향후 신뢰성 있는 연구 방향성과 해체계획 수립을 위해 적극적으로 활용 가능한 기초자료가 될 것이다.

참고문헌

- [1] H.J. Cho, “A study on Prediction of Radioactive Source-term from the Decommissioning of Domestic NPPs by using CRUDTRAN Code”, Master's Degree, Chosun University, (2017).
- [2] 박주엽, “안전규제 연구현황 및 규제적용 방향”, 원자력안전규제정보회의, 한국원자력안전기술원, (2022).
- [3] 한국원자력학회, “KNS-EPRI 연계 제 19회 원전 수화학 및 부식 워크샵”, (2023).
- [4] 유병태, “원자로 일차계통 아연주입 노심안전성 평가”, KNF-ENG-02.
- [5] H.M. Kim, “A study an the analysis of waste arising from decontamination and decommissioning using corrosion product evaluation code”, Master's Degree, Chosun University, (2014).
- [6] J.S Song, T.B. Yoon and S.H. Lee, “A Study on Corrosion Product Behavior Prediction for Domestic PWR Primary System by using CRUDTRAN”, JNFCWT 13(4) (2015) pp.253-262.
- [7] J.S Song, H.M. Kim and S.H. Lee, “A Study on Radioactive Source-term Assessment Method for Decommissioning PWR Primary System”, JNFCWT 12(2) (2014) pp.153-164.
- [8] 이준규 외 9명, “2021년도 예비타당성조사 보고서_원전해체 경쟁력 강화 기술 개발사업”, 한국과학기술기획평가원 (2021).
- [9] 황태원 외 1명, “중수로 원전 해체 선원항 평가기술 개발 및 검증”, 지식경제부, (2010).
- [10] 신상화, “원자로압력용기 방사화 특성분석”, 석사학위 논문, 경희대학교(2003)
- [11] K.S. Jeong, et al., “A State-of-the-Art Report on Technologies of a Safety Assessment and a Radioactivity Exposure Assessment for the Decommissioning Process of Nuclear Facilities”, KAERI/AR-782/2007.
- [12] J.S Song, S.H. Lee and S.S, Shin, “A Study on the Assessment of Source-term for PWR Primary System Using MonteCarlo Code”, JNFCWT 16(3) (2018) pp.331-337.

- [13] M.E. Miyombo, et al., “Minimum dose path planning during reactor coolant system maintenance with corrosion product activity”, Nuclear Engineering and Design vol.396 (2022).
- [14] 신지민 외 3명, “토륨 함유 가스맨틀 사용에 따른 외부피폭 선량평가를 위한 MicroShield SW 적용성 평가”, 방사선방어학회지, Vol.11 (2022)
- [15] 김기철, “원전해체 제염 절단 기술 개발 현황”, (주)한전KPS, (2020).
- [16] J.S Song, M.Y. Jeong and S.H. Lee, “A Study on the Applicability for Primary System Decontamination through Analysis on NPP Decommission Technology and International Experience”, JNFCWT 14(1) (2016) pp.45-55.
- [17] 양호연, “제염 해체 기술의 소개”, 한국방사선진흥협회 원자력발전소 해체 실무역량 향상과정 2차, (2021).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance”, SAFETY STANDARDS SERIES No. RS-G-1.7 (2004).
- [19] 원자력안전위원회 고시 제2023-7호, “방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정”, 원자력안전위원회(2023)
- [20] 염유선, “방사선과 방사능”, NCS기반 방사선 측정평가 전문인력 양성교육, (2021).
- [21] C.B. Lee, “Modeling of Corrosion Product Transport in PWR Primary Coolant”, Doctor's Degree, Massachusetts Institute of Technology, (2017).
- [22] W.Y. Maeng et al., “AOA(Axial Offset Anomaly)방지를 위한 크러드 및 붕소 침착 억제 기술개발” 한국원자력연구원, (2010).
- [23] B.K. Park, et al., “원자로냉각재계통 피복관 크러드 층에서 수화학적 거동 분석 모델 개발”, 한국원자력연구원, (2010).
- [24] S.J. Seo, et al., “Modeling of deposition and erosion of CRUD on fuel surfaces under sub-cooled nucleate boiling in PWR”, Journal of Nuclear Engineering and Technology vol.55 (2023)
- [25] J.H. Park, et al., “A Study on the Assessment of the Radioactivity Inventory Deposited in the Reactor Coolant System during the Decommissioning of Kori Unit 1”, Journal of Radiation Industry 16(1) (2022) 81-92.

- [26] N.B, Jang, “Development of a Steady State Model for Analyzing the Nuclide Concentration Dynamics in Multi-Fule-Reprocess-Units”, Master’s Degree, Ajou University, (2004).
- [27] L. Snoj, M. Ravnik, “Calculation of Power Density with MCNP in TRIGA reactor”, International Conference (2006).
- [28] 홍상범 외 4명, “연구로 2호기 방사화 수조 콘크리트의 재고량 평가에 관한 연구”, 방사선방어학회지 37(4) (2012) 202-206.
- [29] 이재기, “방사선방호원론”, 한국방사선진흥협회, (2016).
- [30] S.H. Lee, M.H. Lee, H.J. An, J.S. Song, “A Study on the Evaluation of Radiation Exposure Dose for Treatment Worker of Decommissioning Metal Wastes in Mobile Radiochemistry Analysis Facility”, Journal of Radiation Industry 15(1) (2023) 65-69.
- [31] H.Y, Lee, “A study on the building of scenarios for cutting large structures considering ALARA when decommissioning nuclear power plants”, Doctor’s Degree, Chosun University, (2023).
- [32] S.B, Han, “An External Exposure Dose Assessment for Radiological Workers in Geophysics Research with a Radioactive Source”, Master’s Degree, Seoul University, (2023).
- [33] (주)한국수력원자력, “원전 해체 선원항 평가 기술 개발 최종보고서”, 산업통상자원부, (2015)
- [34] B. Volmert, et al., “Illustration of Nagra’s AMAC approach to Kori-1 NPP decommissioning based on experience from its detailed application to Swiss NPPs”, Nuclear Engineering and Technology, 53 (2021) 1491-1510.
- [35] (주)한국수력원자력, “고리 원자력 1호기 원자로 압력용기의 중성자 조사취화 종합 안전성평가 보고서”, (2006)
- [36] (주)한국수력원자력, “고리 1 호기 최종안전성분석보고서(공개용), (2019).

부록 I

- 방사화 부식생성물 평가결과 데이터 (CRUDTRAN) -

Title : Kori-1 case for CRUDTRAN

TIME (day)	S/G Fe-CRUD (mg-Fe/cm ²)	CORE Fe-CRUD (mg-Fe/cm ²)	Co60 S/G (uCi/cm ²)	Co58 S/G (uCi/cm ²)	Co60 Core (uCi/cm ²)	Co58 Core (uCi/cm ²)	Co60 Cool (uCi/cm ³)	Co58 Cool (uCi/cm ³)
0.0	0.977E-02	0.396E-21	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1.0	0.102E-01	0.599E-03	0.521E-05	0.287E-03	0.891E-04	0.213E-02	0.155E-06	0.378E-05
2.0	0.106E-01	0.922E-03	0.202E-04	0.947E-03	0.237E-03	0.565E-02	0.272E-06	0.669E-05
3.0	0.110E-01	0.125E-02	0.429E-04	0.191E-02	0.443E-03	0.106E-01	0.383E-06	0.950E-05
4.0	0.114E-01	0.157E-02	0.729E-04	0.317E-02	0.711E-03	0.169E-01	0.494E-06	0.123E-04
5.0	0.118E-01	0.189E-02	0.110E-03	0.472E-02	0.104E-02	0.247E-01	0.606E-06	0.152E-04
6.0	0.122E-01	0.221E-02	0.154E-03	0.654E-02	0.143E-02	0.339E-01	0.720E-06	0.182E-04
7.0	0.126E-01	0.254E-02	0.205E-03	0.864E-02	0.188E-02	0.446E-01	0.835E-06	0.211E-04
8.0	0.130E-01	0.286E-02	0.263E-03	0.110E-01	0.240E-02	0.566E-01	0.952E-06	0.242E-04
9.0	0.134E-01	0.318E-02	0.328E-03	0.136E-01	0.297E-02	0.701E-01	0.107E-05	0.272E-04
10.0	0.138E-01	0.351E-02	0.400E-03	0.165E-01	0.361E-02	0.850E-01	0.119E-05	0.303E-04
11.0	0.142E-01	0.383E-02	0.479E-03	0.197E-01	0.431E-02	0.101E+00	0.131E-05	0.335E-04
12.0	0.146E-01	0.415E-02	0.565E-03	0.231E-01	0.508E-02	0.119E+00	0.143E-05	0.366E-04
13.0	0.150E-01	0.448E-02	0.657E-03	0.267E-01	0.590E-02	0.138E+00	0.155E-05	0.398E-04
14.0	0.154E-01	0.480E-02	0.757E-03	0.306E-01	0.679E-02	0.158E+00	0.168E-05	0.430E-04
15.0	0.158E-01	0.512E-02	0.863E-03	0.348E-01	0.774E-02	0.180E+00	0.180E-05	0.462E-04
16.0	0.162E-01	0.545E-02	0.976E-03	0.392E-01	0.875E-02	0.203E+00	0.192E-05	0.494E-04
17.0	0.166E-01	0.577E-02	0.110E-02	0.438E-01	0.983E-02	0.228E+00	0.205E-05	0.526E-04
18.0	0.170E-01	0.609E-02	0.122E-02	0.486E-01	0.110E-01	0.254E+00	0.218E-05	0.558E-04
19.0	0.173E-01	0.641E-02	0.136E-02	0.537E-01	0.122E-01	0.281E+00	0.230E-05	0.591E-04
20.0	0.177E-01	0.674E-02	0.150E-02	0.590E-01	0.134E-01	0.309E+00	0.243E-05	0.623E-04
21.0	0.181E-01	0.706E-02	0.164E-02	0.646E-01	0.147E-01	0.339E+00	0.256E-05	0.655E-04
22.0	0.185E-01	0.738E-02	0.180E-02	0.703E-01	0.161E-01	0.370E+00	0.268E-05	0.688E-04
23.0	0.189E-01	0.771E-02	0.196E-02	0.763E-01	0.176E-01	0.403E+00	0.281E-05	0.720E-04
24.0	0.193E-01	0.803E-02	0.212E-02	0.825E-01	0.191E-01	0.436E+00	0.294E-05	0.752E-04
25.0	0.197E-01	0.835E-02	0.230E-02	0.889E-01	0.207E-01	0.471E+00	0.307E-05	0.785E-04
26.0	0.201E-01	0.868E-02	0.248E-02	0.955E-01	0.223E-01	0.507E+00	0.320E-05	0.817E-04
27.0	0.205E-01	0.900E-02	0.267E-02	0.102E+00	0.240E-01	0.545E+00	0.333E-05	0.849E-04
28.0	0.209E-01	0.932E-02	0.286E-02	0.109E+00	0.258E-01	0.583E+00	0.346E-05	0.881E-04
29.0	0.213E-01	0.965E-02	0.306E-02	0.116E+00	0.276E-01	0.623E+00	0.359E-05	0.913E-04
30.0	0.217E-01	0.997E-02	0.327E-02	0.124E+00	0.295E-01	0.665E+00	0.372E-05	0.945E-04
31.0	0.221E-01	0.103E-01	0.348E-02	0.132E+00	0.314E-01	0.707E+00	0.385E-05	0.977E-04
32.0	0.225E-01	0.106E-01	0.370E-02	0.139E+00	0.334E-01	0.750E+00	0.398E-05	0.101E-03
33.0	0.229E-01	0.109E-01	0.393E-02	0.147E+00	0.355E-01	0.795E+00	0.411E-05	0.104E-03
34.0	0.233E-01	0.113E-01	0.416E-02	0.155E+00	0.376E-01	0.841E+00	0.424E-05	0.107E-03
35.0	0.237E-01	0.116E-01	0.440E-02	0.164E+00	0.398E-01	0.888E+00	0.438E-05	0.110E-03
35.1	0.238E-01	0.116E-01	0.443E-02	0.165E+00	0.401E-01	0.893E+00	0.439E-05	0.111E-03
36.0	0.241E-01	0.119E-01	0.466E-02	0.172E+00	0.421E-01	0.936E+00	0.461E-05	0.116E-03
37.0	0.246E-01	0.121E-01	0.492E-02	0.181E+00	0.443E-01	0.984E+00	0.476E-05	0.119E-03
38.0	0.250E-01	0.124E-01	0.519E-02	0.190E+00	0.466E-01	0.103E+01	0.490E-05	0.123E-03
39.0	0.254E-01	0.126E-01	0.546E-02	0.200E+00	0.490E-01	0.108E+01	0.505E-05	0.126E-03
40.0	0.258E-01	0.129E-01	0.575E-02	0.209E+00	0.514E-01	0.113E+01	0.520E-05	0.129E-03

41.0	0.262E-01	0.132E-01	0.604E-02	0.218E+00	0.538E-01	0.118E+01	0.534E-05	0.133E-03
42.0	0.266E-01	0.134E-01	0.634E-02	0.228E+00	0.563E-01	0.124E+01	0.549E-05	0.136E-03
43.0	0.270E-01	0.137E-01	0.665E-02	0.238E+00	0.588E-01	0.129E+01	0.563E-05	0.139E-03
44.0	0.275E-01	0.140E-01	0.696E-02	0.248E+00	0.614E-01	0.134E+01	0.577E-05	0.142E-03
45.0	0.279E-01	0.142E-01	0.728E-02	0.258E+00	0.640E-01	0.140E+01	0.592E-05	0.145E-03
46.0	0.283E-01	0.145E-01	0.761E-02	0.268E+00	0.667E-01	0.145E+01	0.606E-05	0.149E-03
47.0	0.287E-01	0.148E-01	0.794E-02	0.279E+00	0.694E-01	0.151E+01	0.620E-05	0.152E-03
48.0	0.291E-01	0.150E-01	0.829E-02	0.289E+00	0.721E-01	0.156E+01	0.634E-05	0.155E-03
49.0	0.295E-01	0.153E-01	0.864E-02	0.300E+00	0.749E-01	0.162E+01	0.648E-05	0.158E-03
50.0	0.299E-01	0.156E-01	0.899E-02	0.311E+00	0.777E-01	0.168E+01	0.662E-05	0.161E-03
51.0	0.303E-01	0.158E-01	0.935E-02	0.322E+00	0.806E-01	0.173E+01	0.676E-05	0.164E-03
52.0	0.308E-01	0.161E-01	0.972E-02	0.333E+00	0.835E-01	0.179E+01	0.690E-05	0.167E-03
53.0	0.312E-01	0.164E-01	0.101E-01	0.344E+00	0.865E-01	0.185E+01	0.703E-05	0.170E-03
54.0	0.316E-01	0.166E-01	0.105E-01	0.356E+00	0.895E-01	0.191E+01	0.717E-05	0.172E-03
55.0	0.320E-01	0.169E-01	0.109E-01	0.367E+00	0.926E-01	0.197E+01	0.731E-05	0.175E-03
56.0	0.324E-01	0.172E-01	0.113E-01	0.379E+00	0.957E-01	0.203E+01	0.745E-05	0.178E-03
57.0	0.328E-01	0.174E-01	0.117E-01	0.390E+00	0.988E-01	0.210E+01	0.758E-05	0.181E-03
58.0	0.332E-01	0.177E-01	0.121E-01	0.402E+00	0.102E+00	0.216E+01	0.772E-05	0.184E-03
59.0	0.337E-01	0.179E-01	0.125E-01	0.414E+00	0.105E+00	0.222E+01	0.786E-05	0.186E-03
60.0	0.341E-01	0.182E-01	0.129E-01	0.426E+00	0.109E+00	0.229E+01	0.799E-05	0.189E-03
61.0	0.345E-01	0.185E-01	0.134E-01	0.438E+00	0.112E+00	0.235E+01	0.813E-05	0.192E-03
62.0	0.349E-01	0.187E-01	0.138E-01	0.451E+00	0.115E+00	0.242E+01	0.826E-05	0.195E-03
63.0	0.353E-01	0.190E-01	0.142E-01	0.463E+00	0.119E+00	0.248E+01	0.840E-05	0.197E-03
64.0	0.357E-01	0.193E-01	0.147E-01	0.475E+00	0.122E+00	0.255E+01	0.854E-05	0.200E-03
65.0	0.361E-01	0.195E-01	0.151E-01	0.488E+00	0.126E+00	0.262E+01	0.867E-05	0.203E-03
66.0	0.365E-01	0.198E-01	0.156E-01	0.501E+00	0.129E+00	0.269E+01	0.880E-05	0.205E-03
67.0	0.370E-01	0.201E-01	0.161E-01	0.513E+00	0.133E+00	0.276E+01	0.894E-05	0.208E-03
68.0	0.374E-01	0.203E-01	0.165E-01	0.526E+00	0.136E+00	0.282E+01	0.907E-05	0.210E-03
69.0	0.378E-01	0.206E-01	0.170E-01	0.539E+00	0.140E+00	0.289E+01	0.921E-05	0.213E-03
70.0	0.382E-01	0.209E-01	0.175E-01	0.552E+00	0.144E+00	0.297E+01	0.934E-05	0.216E-03
71.0	0.386E-01	0.211E-01	0.180E-01	0.565E+00	0.148E+00	0.304E+01	0.948E-05	0.218E-03
72.0	0.390E-01	0.214E-01	0.185E-01	0.579E+00	0.152E+00	0.311E+01	0.961E-05	0.221E-03
73.0	0.394E-01	0.217E-01	0.190E-01	0.592E+00	0.155E+00	0.318E+01	0.974E-05	0.223E-03
74.0	0.399E-01	0.219E-01	0.195E-01	0.605E+00	0.159E+00	0.326E+01	0.988E-05	0.226E-03
75.0	0.403E-01	0.222E-01	0.200E-01	0.619E+00	0.163E+00	0.333E+01	0.100E-04	0.228E-03
76.0	0.407E-01	0.225E-01	0.206E-01	0.632E+00	0.167E+00	0.340E+01	0.101E-04	0.231E-03
77.0	0.411E-01	0.227E-01	0.211E-01	0.646E+00	0.171E+00	0.348E+01	0.103E-04	0.233E-03
78.0	0.415E-01	0.230E-01	0.216E-01	0.660E+00	0.176E+00	0.356E+01	0.104E-04	0.235E-03
79.0	0.419E-01	0.232E-01	0.222E-01	0.674E+00	0.180E+00	0.363E+01	0.105E-04	0.238E-03
80.0	0.423E-01	0.235E-01	0.227E-01	0.687E+00	0.184E+00	0.371E+01	0.107E-04	0.240E-03
81.0	0.427E-01	0.238E-01	0.233E-01	0.701E+00	0.188E+00	0.379E+01	0.108E-04	0.243E-03
82.0	0.432E-01	0.240E-01	0.239E-01	0.716E+00	0.192E+00	0.386E+01	0.109E-04	0.245E-03
83.0	0.436E-01	0.243E-01	0.244E-01	0.730E+00	0.197E+00	0.394E+01	0.111E-04	0.247E-03
84.0	0.440E-01	0.246E-01	0.250E-01	0.744E+00	0.201E+00	0.402E+01	0.112E-04	0.250E-03
85.0	0.444E-01	0.248E-01	0.256E-01	0.758E+00	0.206E+00	0.410E+01	0.113E-04	0.252E-03
86.0	0.448E-01	0.251E-01	0.262E-01	0.772E+00	0.210E+00	0.418E+01	0.115E-04	0.254E-03
87.0	0.452E-01	0.254E-01	0.268E-01	0.787E+00	0.215E+00	0.426E+01	0.116E-04	0.256E-03
88.0	0.456E-01	0.256E-01	0.274E-01	0.801E+00	0.219E+00	0.435E+01	0.117E-04	0.259E-03
89.0	0.461E-01	0.259E-01	0.280E-01	0.816E+00	0.224E+00	0.443E+01	0.119E-04	0.261E-03
90.0	0.465E-01	0.262E-01	0.286E-01	0.830E+00	0.229E+00	0.451E+01	0.120E-04	0.263E-03

91.0	0.469E-01	0.264E-01	0.292E-01	0.845E+00	0.233E+00	0.460E+01	0.121E-04	0.265E-03
92.0	0.473E-01	0.267E-01	0.298E-01	0.860E+00	0.238E+00	0.468E+01	0.123E-04	0.268E-03
93.0	0.477E-01	0.270E-01	0.305E-01	0.875E+00	0.243E+00	0.476E+01	0.124E-04	0.270E-03
94.0	0.481E-01	0.272E-01	0.311E-01	0.890E+00	0.248E+00	0.485E+01	0.125E-04	0.272E-03
95.0	0.485E-01	0.275E-01	0.318E-01	0.904E+00	0.253E+00	0.494E+01	0.126E-04	0.274E-03
96.0	0.489E-01	0.278E-01	0.324E-01	0.919E+00	0.258E+00	0.502E+01	0.128E-04	0.276E-03
97.0	0.494E-01	0.280E-01	0.331E-01	0.934E+00	0.263E+00	0.511E+01	0.129E-04	0.278E-03
98.0	0.498E-01	0.283E-01	0.337E-01	0.950E+00	0.268E+00	0.520E+01	0.130E-04	0.280E-03
99.0	0.502E-01	0.285E-01	0.344E-01	0.965E+00	0.273E+00	0.528E+01	0.132E-04	0.283E-03
100.0	0.506E-01	0.288E-01	0.351E-01	0.980E+00	0.278E+00	0.537E+01	0.133E-04	0.285E-03
101.0	0.510E-01	0.291E-01	0.358E-01	0.995E+00	0.283E+00	0.546E+01	0.134E-04	0.287E-03
102.0	0.514E-01	0.293E-01	0.364E-01	0.101E+01	0.288E+00	0.555E+01	0.136E-04	0.289E-03
103.0	0.518E-01	0.296E-01	0.371E-01	0.103E+01	0.293E+00	0.564E+01	0.137E-04	0.291E-03
103.2	0.519E-01	0.297E-01	0.373E-01	0.103E+01	0.295E+00	0.566E+01	0.137E-04	0.291E-03
104.0	0.523E-01	0.298E-01	0.379E-01	0.104E+01	0.299E+00	0.573E+01	0.142E-04	0.301E-03
105.0	0.527E-01	0.300E-01	0.386E-01	0.106E+01	0.304E+00	0.582E+01	0.144E-04	0.303E-03
106.0	0.531E-01	0.302E-01	0.393E-01	0.107E+01	0.309E+00	0.591E+01	0.145E-04	0.306E-03
107.0	0.536E-01	0.304E-01	0.401E-01	0.109E+01	0.314E+00	0.599E+01	0.147E-04	0.308E-03
108.0	0.540E-01	0.306E-01	0.408E-01	0.111E+01	0.320E+00	0.608E+01	0.148E-04	0.311E-03
109.0	0.544E-01	0.308E-01	0.416E-01	0.112E+01	0.325E+00	0.617E+01	0.150E-04	0.313E-03
110.0	0.549E-01	0.310E-01	0.424E-01	0.114E+01	0.330E+00	0.626E+01	0.151E-04	0.315E-03
111.0	0.553E-01	0.311E-01	0.432E-01	0.115E+01	0.336E+00	0.635E+01	0.153E-04	0.318E-03
112.0	0.557E-01	0.313E-01	0.439E-01	0.117E+01	0.341E+00	0.643E+01	0.155E-04	0.320E-03
113.0	0.562E-01	0.315E-01	0.447E-01	0.119E+01	0.346E+00	0.652E+01	0.156E-04	0.322E-03
114.0	0.566E-01	0.317E-01	0.455E-01	0.120E+01	0.352E+00	0.661E+01	0.158E-04	0.325E-03
115.0	0.570E-01	0.319E-01	0.463E-01	0.122E+01	0.357E+00	0.670E+01	0.159E-04	0.327E-03
116.0	0.575E-01	0.321E-01	0.472E-01	0.124E+01	0.363E+00	0.678E+01	0.161E-04	0.329E-03
117.0	0.579E-01	0.323E-01	0.480E-01	0.125E+01	0.368E+00	0.687E+01	0.162E-04	0.331E-03
118.0	0.583E-01	0.325E-01	0.488E-01	0.127E+01	0.374E+00	0.696E+01	0.164E-04	0.333E-03
119.0	0.587E-01	0.327E-01	0.497E-01	0.129E+01	0.379E+00	0.705E+01	0.165E-04	0.335E-03
120.0	0.592E-01	0.329E-01	0.505E-01	0.130E+01	0.385E+00	0.714E+01	0.166E-04	0.337E-03
121.0	0.596E-01	0.330E-01	0.514E-01	0.132E+01	0.390E+00	0.722E+01	0.168E-04	0.340E-03
122.0	0.600E-01	0.332E-01	0.522E-01	0.133E+01	0.396E+00	0.731E+01	0.169E-04	0.342E-03
123.0	0.605E-01	0.334E-01	0.531E-01	0.135E+01	0.401E+00	0.740E+01	0.171E-04	0.344E-03
124.0	0.609E-01	0.336E-01	0.540E-01	0.137E+01	0.407E+00	0.749E+01	0.172E-04	0.346E-03
125.0	0.613E-01	0.338E-01	0.548E-01	0.138E+01	0.413E+00	0.757E+01	0.174E-04	0.348E-03
126.0	0.618E-01	0.340E-01	0.557E-01	0.140E+01	0.418E+00	0.766E+01	0.175E-04	0.349E-03
127.0	0.622E-01	0.342E-01	0.566E-01	0.142E+01	0.424E+00	0.775E+01	0.177E-04	0.351E-03
128.0	0.626E-01	0.344E-01	0.575E-01	0.143E+01	0.430E+00	0.784E+01	0.178E-04	0.353E-03
129.0	0.631E-01	0.346E-01	0.584E-01	0.145E+01	0.435E+00	0.792E+01	0.179E-04	0.355E-03
130.0	0.635E-01	0.348E-01	0.593E-01	0.147E+01	0.441E+00	0.801E+01	0.181E-04	0.357E-03
131.0	0.639E-01	0.350E-01	0.603E-01	0.148E+01	0.447E+00	0.810E+01	0.182E-04	0.359E-03
132.0	0.644E-01	0.351E-01	0.612E-01	0.150E+01	0.453E+00	0.819E+01	0.184E-04	0.361E-03
133.0	0.648E-01	0.353E-01	0.621E-01	0.152E+01	0.459E+00	0.828E+01	0.185E-04	0.363E-03
134.0	0.652E-01	0.355E-01	0.631E-01	0.153E+01	0.464E+00	0.836E+01	0.187E-04	0.364E-03
135.0	0.657E-01	0.357E-01	0.640E-01	0.155E+01	0.470E+00	0.845E+01	0.188E-04	0.366E-03
136.0	0.661E-01	0.359E-01	0.650E-01	0.157E+01	0.476E+00	0.854E+01	0.189E-04	0.368E-03
137.0	0.665E-01	0.361E-01	0.659E-01	0.158E+01	0.482E+00	0.863E+01	0.191E-04	0.370E-03
138.0	0.669E-01	0.363E-01	0.669E-01	0.160E+01	0.488E+00	0.872E+01	0.192E-04	0.371E-03
139.0	0.674E-01	0.365E-01	0.679E-01	0.162E+01	0.494E+00	0.881E+01	0.193E-04	0.373E-03
140.0	0.678E-01	0.367E-01	0.689E-01	0.163E+01	0.500E+00	0.889E+01	0.195E-04	0.375E-03

141.0	0.682E-01	0.369E-01	0.699E-01	0.165E+01	0.506E+00	0.898E+01	0.196E-04	0.376E-03
142.0	0.687E-01	0.370E-01	0.708E-01	0.167E+01	0.512E+00	0.907E+01	0.198E-04	0.378E-03
143.0	0.691E-01	0.372E-01	0.718E-01	0.168E+01	0.518E+00	0.916E+01	0.199E-04	0.380E-03
144.0	0.695E-01	0.374E-01	0.729E-01	0.170E+01	0.524E+00	0.925E+01	0.200E-04	0.381E-03
145.0	0.700E-01	0.376E-01	0.739E-01	0.172E+01	0.530E+00	0.934E+01	0.202E-04	0.383E-03
146.0	0.704E-01	0.378E-01	0.749E-01	0.173E+01	0.536E+00	0.943E+01	0.203E-04	0.385E-03
147.0	0.708E-01	0.380E-01	0.759E-01	0.175E+01	0.542E+00	0.952E+01	0.204E-04	0.386E-03
148.0	0.713E-01	0.382E-01	0.769E-01	0.177E+01	0.549E+00	0.960E+01	0.206E-04	0.388E-03
149.0	0.717E-01	0.384E-01	0.780E-01	0.178E+01	0.555E+00	0.969E+01	0.207E-04	0.389E-03
150.0	0.721E-01	0.386E-01	0.790E-01	0.180E+01	0.561E+00	0.978E+01	0.208E-04	0.391E-03
151.0	0.726E-01	0.388E-01	0.801E-01	0.182E+01	0.567E+00	0.987E+01	0.210E-04	0.392E-03
152.0	0.730E-01	0.389E-01	0.811E-01	0.183E+01	0.574E+00	0.996E+01	0.211E-04	0.394E-03
153.0	0.734E-01	0.391E-01	0.822E-01	0.185E+01	0.580E+00	0.101E+02	0.212E-04	0.395E-03
154.0	0.739E-01	0.393E-01	0.833E-01	0.187E+01	0.586E+00	0.101E+02	0.214E-04	0.397E-03
155.0	0.743E-01	0.395E-01	0.843E-01	0.188E+01	0.593E+00	0.102E+02	0.215E-04	0.398E-03
156.0	0.747E-01	0.397E-01	0.854E-01	0.190E+01	0.599E+00	0.103E+02	0.216E-04	0.400E-03
157.0	0.752E-01	0.399E-01	0.865E-01	0.192E+01	0.605E+00	0.104E+02	0.218E-04	0.401E-03
158.0	0.756E-01	0.401E-01	0.876E-01	0.193E+01	0.612E+00	0.105E+02	0.219E-04	0.403E-03
159.0	0.760E-01	0.403E-01	0.887E-01	0.195E+01	0.618E+00	0.106E+02	0.220E-04	0.404E-03
160.0	0.764E-01	0.405E-01	0.898E-01	0.197E+01	0.625E+00	0.107E+02	0.222E-04	0.405E-03
161.0	0.769E-01	0.407E-01	0.909E-01	0.198E+01	0.631E+00	0.108E+02	0.223E-04	0.407E-03
162.0	0.773E-01	0.409E-01	0.920E-01	0.200E+01	0.638E+00	0.109E+02	0.224E-04	0.408E-03
163.0	0.777E-01	0.410E-01	0.931E-01	0.202E+01	0.644E+00	0.110E+02	0.226E-04	0.410E-03
164.0	0.782E-01	0.412E-01	0.943E-01	0.203E+01	0.651E+00	0.110E+02	0.227E-04	0.411E-03
165.0	0.786E-01	0.414E-01	0.954E-01	0.205E+01	0.657E+00	0.111E+02	0.228E-04	0.412E-03
166.0	0.790E-01	0.416E-01	0.965E-01	0.207E+01	0.664E+00	0.112E+02	0.230E-04	0.414E-03
167.0	0.795E-01	0.418E-01	0.977E-01	0.208E+01	0.671E+00	0.113E+02	0.231E-04	0.415E-03
168.0	0.799E-01	0.420E-01	0.988E-01	0.210E+01	0.677E+00	0.114E+02	0.232E-04	0.416E-03
169.0	0.803E-01	0.422E-01	0.100E+00	0.212E+01	0.684E+00	0.115E+02	0.233E-04	0.418E-03
170.0	0.808E-01	0.424E-01	0.101E+00	0.213E+01	0.691E+00	0.116E+02	0.235E-04	0.419E-03
171.0	0.812E-01	0.426E-01	0.102E+00	0.215E+01	0.697E+00	0.117E+02	0.236E-04	0.420E-03
171.3	0.813E-01	0.426E-01	0.103E+00	0.215E+01	0.699E+00	0.117E+02	0.236E-04	0.421E-03
172.0	0.816E-01	0.427E-01	0.104E+00	0.217E+01	0.704E+00	0.118E+02	0.248E-04	0.440E-03
173.0	0.821E-01	0.428E-01	0.105E+00	0.218E+01	0.710E+00	0.119E+02	0.250E-04	0.442E-03
174.0	0.826E-01	0.429E-01	0.106E+00	0.220E+01	0.717E+00	0.119E+02	0.251E-04	0.444E-03
175.0	0.830E-01	0.429E-01	0.107E+00	0.222E+01	0.723E+00	0.120E+02	0.253E-04	0.446E-03
176.0	0.835E-01	0.430E-01	0.109E+00	0.224E+01	0.730E+00	0.121E+02	0.255E-04	0.447E-03
177.0	0.839E-01	0.431E-01	0.110E+00	0.225E+01	0.736E+00	0.122E+02	0.257E-04	0.449E-03
178.0	0.844E-01	0.432E-01	0.111E+00	0.227E+01	0.743E+00	0.123E+02	0.258E-04	0.451E-03
179.0	0.849E-01	0.433E-01	0.112E+00	0.229E+01	0.749E+00	0.124E+02	0.260E-04	0.453E-03
180.0	0.853E-01	0.434E-01	0.114E+00	0.231E+01	0.755E+00	0.124E+02	0.262E-04	0.455E-03
181.0	0.858E-01	0.434E-01	0.115E+00	0.232E+01	0.762E+00	0.125E+02	0.263E-04	0.457E-03
182.0	0.862E-01	0.435E-01	0.116E+00	0.234E+01	0.768E+00	0.126E+02	0.265E-04	0.458E-03
183.0	0.867E-01	0.436E-01	0.118E+00	0.236E+01	0.774E+00	0.127E+02	0.267E-04	0.460E-03
184.0	0.871E-01	0.437E-01	0.119E+00	0.237E+01	0.781E+00	0.128E+02	0.268E-04	0.462E-03
185.0	0.876E-01	0.438E-01	0.120E+00	0.239E+01	0.787E+00	0.128E+02	0.270E-04	0.463E-03
186.0	0.881E-01	0.439E-01	0.122E+00	0.241E+01	0.793E+00	0.129E+02	0.272E-04	0.465E-03
187.0	0.885E-01	0.439E-01	0.123E+00	0.243E+01	0.800E+00	0.130E+02	0.273E-04	0.466E-03
188.0	0.890E-01	0.440E-01	0.125E+00	0.244E+01	0.806E+00	0.131E+02	0.275E-04	0.468E-03
189.0	0.894E-01	0.441E-01	0.126E+00	0.246E+01	0.812E+00	0.131E+02	0.276E-04	0.470E-03
190.0	0.899E-01	0.442E-01	0.127E+00	0.248E+01	0.818E+00	0.132E+02	0.278E-04	0.471E-03

191.0	0.903E-01	0.443E-01	0.129E+00	0.249E+01	0.825E+00	0.133E+02	0.280E-04	0.473E-03
192.0	0.908E-01	0.444E-01	0.130E+00	0.251E+01	0.831E+00	0.134E+02	0.281E-04	0.474E-03
193.0	0.913E-01	0.445E-01	0.132E+00	0.253E+01	0.837E+00	0.134E+02	0.283E-04	0.476E-03
194.0	0.917E-01	0.445E-01	0.133E+00	0.255E+01	0.843E+00	0.135E+02	0.284E-04	0.477E-03
195.0	0.922E-01	0.446E-01	0.134E+00	0.256E+01	0.849E+00	0.136E+02	0.286E-04	0.478E-03
196.0	0.926E-01	0.447E-01	0.136E+00	0.258E+01	0.855E+00	0.137E+02	0.288E-04	0.480E-03
197.0	0.931E-01	0.448E-01	0.137E+00	0.260E+01	0.862E+00	0.137E+02	0.289E-04	0.481E-03
198.0	0.936E-01	0.449E-01	0.139E+00	0.261E+01	0.868E+00	0.138E+02	0.291E-04	0.482E-03
199.0	0.940E-01	0.450E-01	0.140E+00	0.263E+01	0.874E+00	0.139E+02	0.292E-04	0.484E-03
200.0	0.945E-01	0.450E-01	0.142E+00	0.265E+01	0.880E+00	0.139E+02	0.294E-04	0.485E-03
201.0	0.949E-01	0.451E-01	0.143E+00	0.266E+01	0.886E+00	0.140E+02	0.295E-04	0.486E-03
202.0	0.954E-01	0.452E-01	0.145E+00	0.268E+01	0.892E+00	0.141E+02	0.297E-04	0.488E-03
203.0	0.958E-01	0.453E-01	0.146E+00	0.269E+01	0.898E+00	0.141E+02	0.298E-04	0.489E-03
204.0	0.963E-01	0.454E-01	0.148E+00	0.271E+01	0.904E+00	0.142E+02	0.300E-04	0.490E-03
205.0	0.968E-01	0.455E-01	0.149E+00	0.273E+01	0.911E+00	0.143E+02	0.301E-04	0.491E-03
206.0	0.972E-01	0.455E-01	0.151E+00	0.274E+01	0.917E+00	0.143E+02	0.303E-04	0.493E-03
207.0	0.977E-01	0.456E-01	0.152E+00	0.276E+01	0.923E+00	0.144E+02	0.304E-04	0.494E-03
208.0	0.981E-01	0.457E-01	0.154E+00	0.278E+01	0.929E+00	0.145E+02	0.306E-04	0.495E-03
209.0	0.986E-01	0.458E-01	0.155E+00	0.279E+01	0.935E+00	0.145E+02	0.307E-04	0.496E-03
210.0	0.990E-01	0.459E-01	0.157E+00	0.281E+01	0.941E+00	0.146E+02	0.309E-04	0.497E-03
211.0	0.995E-01	0.460E-01	0.158E+00	0.282E+01	0.947E+00	0.147E+02	0.310E-04	0.498E-03
212.0	0.100E+00	0.460E-01	0.160E+00	0.284E+01	0.953E+00	0.147E+02	0.311E-04	0.499E-03
213.0	0.100E+00	0.461E-01	0.161E+00	0.286E+01	0.959E+00	0.148E+02	0.313E-04	0.500E-03
214.0	0.101E+00	0.462E-01	0.163E+00	0.287E+01	0.965E+00	0.149E+02	0.314E-04	0.502E-03
215.0	0.101E+00	0.463E-01	0.165E+00	0.289E+01	0.971E+00	0.149E+02	0.316E-04	0.503E-03
216.0	0.102E+00	0.464E-01	0.166E+00	0.290E+01	0.977E+00	0.150E+02	0.317E-04	0.504E-03
217.0	0.102E+00	0.465E-01	0.168E+00	0.292E+01	0.983E+00	0.151E+02	0.319E-04	0.505E-03
218.0	0.103E+00	0.466E-01	0.169E+00	0.294E+01	0.989E+00	0.151E+02	0.320E-04	0.506E-03
219.0	0.103E+00	0.466E-01	0.171E+00	0.295E+01	0.995E+00	0.152E+02	0.321E-04	0.507E-03
220.0	0.104E+00	0.467E-01	0.172E+00	0.297E+01	0.100E+01	0.153E+02	0.323E-04	0.508E-03
221.0	0.104E+00	0.468E-01	0.174E+00	0.298E+01	0.101E+01	0.153E+02	0.324E-04	0.509E-03
222.0	0.105E+00	0.469E-01	0.176E+00	0.300E+01	0.101E+01	0.154E+02	0.326E-04	0.509E-03
223.0	0.105E+00	0.470E-01	0.177E+00	0.301E+01	0.102E+01	0.154E+02	0.327E-04	0.510E-03
224.0	0.105E+00	0.471E-01	0.179E+00	0.303E+01	0.102E+01	0.155E+02	0.328E-04	0.511E-03
225.0	0.106E+00	0.471E-01	0.181E+00	0.304E+01	0.103E+01	0.156E+02	0.330E-04	0.512E-03
226.0	0.106E+00	0.472E-01	0.182E+00	0.306E+01	0.104E+01	0.156E+02	0.331E-04	0.513E-03
227.0	0.107E+00	0.473E-01	0.184E+00	0.307E+01	0.104E+01	0.157E+02	0.333E-04	0.514E-03
228.0	0.107E+00	0.474E-01	0.186E+00	0.309E+01	0.105E+01	0.157E+02	0.334E-04	0.515E-03
229.0	0.108E+00	0.475E-01	0.187E+00	0.310E+01	0.105E+01	0.158E+02	0.335E-04	0.516E-03
230.0	0.108E+00	0.476E-01	0.189E+00	0.312E+01	0.106E+01	0.159E+02	0.337E-04	0.517E-03
231.0	0.109E+00	0.476E-01	0.190E+00	0.313E+01	0.107E+01	0.159E+02	0.338E-04	0.517E-03
232.0	0.109E+00	0.477E-01	0.192E+00	0.315E+01	0.107E+01	0.160E+02	0.339E-04	0.518E-03
233.0	0.110E+00	0.478E-01	0.194E+00	0.316E+01	0.108E+01	0.160E+02	0.341E-04	0.519E-03
234.0	0.110E+00	0.479E-01	0.196E+00	0.318E+01	0.108E+01	0.161E+02	0.342E-04	0.520E-03
235.0	0.110E+00	0.480E-01	0.197E+00	0.319E+01	0.109E+01	0.162E+02	0.343E-04	0.521E-03
236.0	0.111E+00	0.481E-01	0.199E+00	0.321E+01	0.110E+01	0.162E+02	0.345E-04	0.521E-03
237.0	0.111E+00	0.482E-01	0.201E+00	0.322E+01	0.110E+01	0.163E+02	0.346E-04	0.522E-03
238.0	0.112E+00	0.482E-01	0.202E+00	0.324E+01	0.111E+01	0.163E+02	0.347E-04	0.523E-03
239.0	0.112E+00	0.483E-01	0.204E+00	0.325E+01	0.111E+01	0.164E+02	0.348E-04	0.524E-03
239.4	0.113E+00	0.484E-01	0.205E+00	0.326E+01	0.112E+01	0.164E+02	0.349E-04	0.524E-03
240.0	0.113E+00	0.483E-01	0.206E+00	0.327E+01	0.112E+01	0.164E+02	0.378E-04	0.566E-03

241.0	0.113E+00	0.482E-01	0.208E+00	0.328E+01	0.112E+01	0.165E+02	0.380E-04	0.568E-03
242.0	0.114E+00	0.481E-01	0.210E+00	0.330E+01	0.113E+01	0.165E+02	0.382E-04	0.570E-03
243.0	0.114E+00	0.480E-01	0.212E+00	0.332E+01	0.113E+01	0.166E+02	0.385E-04	0.572E-03
244.0	0.115E+00	0.479E-01	0.214E+00	0.333E+01	0.114E+01	0.166E+02	0.387E-04	0.574E-03
245.0	0.115E+00	0.478E-01	0.216E+00	0.335E+01	0.114E+01	0.167E+02	0.389E-04	0.576E-03
246.0	0.116E+00	0.477E-01	0.217E+00	0.337E+01	0.115E+01	0.167E+02	0.391E-04	0.578E-03
247.0	0.116E+00	0.477E-01	0.219E+00	0.338E+01	0.115E+01	0.167E+02	0.394E-04	0.580E-03
248.0	0.117E+00	0.476E-01	0.221E+00	0.340E+01	0.116E+01	0.168E+02	0.396E-04	0.582E-03
249.0	0.117E+00	0.475E-01	0.223E+00	0.342E+01	0.116E+01	0.168E+02	0.398E-04	0.583E-03
250.0	0.118E+00	0.474E-01	0.225E+00	0.343E+01	0.117E+01	0.168E+02	0.400E-04	0.585E-03
251.0	0.118E+00	0.473E-01	0.227E+00	0.345E+01	0.117E+01	0.169E+02	0.402E-04	0.587E-03
252.0	0.119E+00	0.472E-01	0.229E+00	0.347E+01	0.117E+01	0.169E+02	0.404E-04	0.589E-03
253.0	0.119E+00	0.471E-01	0.232E+00	0.348E+01	0.118E+01	0.169E+02	0.407E-04	0.590E-03
254.0	0.120E+00	0.470E-01	0.234E+00	0.350E+01	0.118E+01	0.169E+02	0.409E-04	0.592E-03
255.0	0.120E+00	0.469E-01	0.236E+00	0.351E+01	0.119E+01	0.170E+02	0.411E-04	0.594E-03
256.0	0.121E+00	0.468E-01	0.238E+00	0.353E+01	0.119E+01	0.170E+02	0.413E-04	0.595E-03
257.0	0.121E+00	0.467E-01	0.240E+00	0.354E+01	0.119E+01	0.170E+02	0.415E-04	0.597E-03
258.0	0.122E+00	0.466E-01	0.242E+00	0.356E+01	0.120E+01	0.170E+02	0.417E-04	0.598E-03
259.0	0.122E+00	0.466E-01	0.244E+00	0.358E+01	0.120E+01	0.171E+02	0.419E-04	0.600E-03
260.0	0.123E+00	0.465E-01	0.246E+00	0.359E+01	0.121E+01	0.171E+02	0.421E-04	0.601E-03
261.0	0.123E+00	0.464E-01	0.248E+00	0.361E+01	0.121E+01	0.171E+02	0.423E-04	0.602E-03
262.0	0.124E+00	0.463E-01	0.250E+00	0.362E+01	0.121E+01	0.171E+02	0.425E-04	0.604E-03
263.0	0.124E+00	0.462E-01	0.253E+00	0.364E+01	0.122E+01	0.171E+02	0.427E-04	0.605E-03
264.0	0.125E+00	0.461E-01	0.255E+00	0.365E+01	0.122E+01	0.171E+02	0.429E-04	0.606E-03
265.0	0.125E+00	0.460E-01	0.257E+00	0.367E+01	0.122E+01	0.172E+02	0.431E-04	0.608E-03
266.0	0.126E+00	0.459E-01	0.259E+00	0.368E+01	0.123E+01	0.172E+02	0.433E-04	0.609E-03
267.0	0.126E+00	0.458E-01	0.261E+00	0.370E+01	0.123E+01	0.172E+02	0.435E-04	0.610E-03
268.0	0.127E+00	0.457E-01	0.263E+00	0.371E+01	0.123E+01	0.172E+02	0.437E-04	0.611E-03
269.0	0.127E+00	0.456E-01	0.266E+00	0.373E+01	0.123E+01	0.172E+02	0.439E-04	0.613E-03
270.0	0.128E+00	0.455E-01	0.268E+00	0.374E+01	0.124E+01	0.172E+02	0.441E-04	0.614E-03
271.0	0.128E+00	0.454E-01	0.270E+00	0.376E+01	0.124E+01	0.172E+02	0.443E-04	0.615E-03
272.0	0.129E+00	0.454E-01	0.272E+00	0.377E+01	0.124E+01	0.172E+02	0.445E-04	0.616E-03
273.0	0.129E+00	0.453E-01	0.275E+00	0.378E+01	0.125E+01	0.172E+02	0.447E-04	0.617E-03
274.0	0.130E+00	0.452E-01	0.277E+00	0.380E+01	0.125E+01	0.172E+02	0.449E-04	0.618E-03
275.0	0.130E+00	0.451E-01	0.279E+00	0.381E+01	0.125E+01	0.172E+02	0.451E-04	0.619E-03
276.0	0.131E+00	0.450E-01	0.281E+00	0.383E+01	0.125E+01	0.172E+02	0.452E-04	0.620E-03
277.0	0.131E+00	0.449E-01	0.284E+00	0.384E+01	0.126E+01	0.172E+02	0.454E-04	0.621E-03
278.0	0.132E+00	0.448E-01	0.286E+00	0.385E+01	0.126E+01	0.172E+02	0.456E-04	0.622E-03
279.0	0.132E+00	0.447E-01	0.288E+00	0.387E+01	0.126E+01	0.172E+02	0.458E-04	0.623E-03
280.0	0.133E+00	0.446E-01	0.291E+00	0.388E+01	0.126E+01	0.172E+02	0.460E-04	0.624E-03
281.0	0.133E+00	0.445E-01	0.293E+00	0.390E+01	0.127E+01	0.172E+02	0.462E-04	0.625E-03
282.0	0.134E+00	0.444E-01	0.295E+00	0.391E+01	0.127E+01	0.172E+02	0.463E-04	0.626E-03
283.0	0.134E+00	0.443E-01	0.298E+00	0.392E+01	0.127E+01	0.172E+02	0.465E-04	0.626E-03
284.0	0.135E+00	0.443E-01	0.300E+00	0.394E+01	0.127E+01	0.172E+02	0.467E-04	0.627E-03
285.0	0.135E+00	0.442E-01	0.302E+00	0.395E+01	0.127E+01	0.172E+02	0.469E-04	0.628E-03
286.0	0.136E+00	0.441E-01	0.305E+00	0.396E+01	0.128E+01	0.172E+02	0.470E-04	0.629E-03
287.0	0.136E+00	0.440E-01	0.307E+00	0.397E+01	0.128E+01	0.172E+02	0.472E-04	0.629E-03
288.0	0.137E+00	0.439E-01	0.309E+00	0.399E+01	0.128E+01	0.172E+02	0.474E-04	0.630E-03
289.0	0.137E+00	0.438E-01	0.312E+00	0.400E+01	0.128E+01	0.172E+02	0.475E-04	0.631E-03
290.0	0.138E+00	0.437E-01	0.314E+00	0.401E+01	0.128E+01	0.172E+02	0.477E-04	0.631E-03

14241	0.539E+01	0.505E-01	0.713E+01	0.569E+01	0.224E+01	0.178E+02	0.565E-04	0.403E-03
14242	0.539E+01	0.505E-01	0.713E+01	0.563E+01	0.224E+01	0.176E+02	0.565E-04	0.400E-03
14243	0.539E+01	0.505E-01	0.713E+01	0.558E+01	0.224E+01	0.175E+02	0.564E-04	0.396E-03
14244	0.539E+01	0.505E-01	0.712E+01	0.552E+01	0.224E+01	0.173E+02	0.564E-04	0.392E-03
14245	0.539E+01	0.505E-01	0.712E+01	0.547E+01	0.224E+01	0.171E+02	0.564E-04	0.388E-03
14246	0.539E+01	0.505E-01	0.712E+01	0.542E+01	0.224E+01	0.170E+02	0.564E-04	0.384E-03
14247	0.539E+01	0.505E-01	0.712E+01	0.536E+01	0.224E+01	0.168E+02	0.564E-04	0.380E-03
14248	0.539E+01	0.505E-01	0.711E+01	0.531E+01	0.224E+01	0.166E+02	0.563E-04	0.377E-03
14249	0.539E+01	0.505E-01	0.711E+01	0.526E+01	0.224E+01	0.165E+02	0.563E-04	0.373E-03
14250	0.539E+01	0.505E-01	0.711E+01	0.521E+01	0.224E+01	0.163E+02	0.563E-04	0.369E-03
14251	0.539E+01	0.505E-01	0.711E+01	0.516E+01	0.223E+01	0.161E+02	0.563E-04	0.366E-03
14252	0.539E+01	0.505E-01	0.710E+01	0.511E+01	0.223E+01	0.160E+02	0.563E-04	0.362E-03
14253	0.539E+01	0.505E-01	0.710E+01	0.506E+01	0.223E+01	0.158E+02	0.562E-04	0.359E-03
14254	0.539E+01	0.505E-01	0.710E+01	0.501E+01	0.223E+01	0.157E+02	0.562E-04	0.355E-03
14255	0.539E+01	0.505E-01	0.710E+01	0.496E+01	0.223E+01	0.155E+02	0.562E-04	0.352E-03
14256	0.539E+01	0.505E-01	0.709E+01	0.491E+01	0.223E+01	0.154E+02	0.562E-04	0.348E-03
14257	0.539E+01	0.505E-01	0.709E+01	0.486E+01	0.223E+01	0.152E+02	0.561E-04	0.345E-03
14258	0.539E+01	0.505E-01	0.709E+01	0.482E+01	0.223E+01	0.151E+02	0.561E-04	0.342E-03
14259	0.539E+01	0.505E-01	0.709E+01	0.477E+01	0.223E+01	0.149E+02	0.561E-04	0.338E-03
14260	0.539E+01	0.505E-01	0.708E+01	0.472E+01	0.223E+01	0.148E+02	0.561E-04	0.335E-03
14261	0.539E+01	0.505E-01	0.708E+01	0.468E+01	0.223E+01	0.146E+02	0.561E-04	0.332E-03
14262	0.539E+01	0.505E-01	0.708E+01	0.463E+01	0.223E+01	0.145E+02	0.560E-04	0.329E-03
14263	0.539E+01	0.505E-01	0.708E+01	0.459E+01	0.223E+01	0.144E+02	0.560E-04	0.325E-03
14264	0.539E+01	0.505E-01	0.707E+01	0.454E+01	0.222E+01	0.142E+02	0.560E-04	0.322E-03
14265	0.539E+01	0.505E-01	0.707E+01	0.450E+01	0.222E+01	0.141E+02	0.560E-04	0.319E-03
14266	0.539E+01	0.505E-01	0.707E+01	0.445E+01	0.222E+01	0.139E+02	0.560E-04	0.316E-03
14267	0.539E+01	0.505E-01	0.707E+01	0.441E+01	0.222E+01	0.138E+02	0.559E-04	0.313E-03
14268	0.539E+01	0.505E-01	0.706E+01	0.437E+01	0.222E+01	0.137E+02	0.559E-04	0.310E-03
14269	0.539E+01	0.505E-01	0.706E+01	0.433E+01	0.222E+01	0.135E+02	0.559E-04	0.307E-03
14270	0.539E+01	0.505E-01	0.706E+01	0.428E+01	0.222E+01	0.134E+02	0.559E-04	0.304E-03
14271	0.539E+01	0.505E-01	0.706E+01	0.424E+01	0.222E+01	0.133E+02	0.559E-04	0.301E-03
14272	0.539E+01	0.505E-01	0.705E+01	0.420E+01	0.222E+01	0.131E+02	0.558E-04	0.298E-03
14273	0.539E+01	0.505E-01	0.705E+01	0.416E+01	0.222E+01	0.130E+02	0.558E-04	0.295E-03
14274	0.539E+01	0.505E-01	0.705E+01	0.412E+01	0.222E+01	0.129E+02	0.558E-04	0.292E-03
14275	0.539E+01	0.505E-01	0.705E+01	0.408E+01	0.222E+01	0.128E+02	0.558E-04	0.289E-03
14276	0.539E+01	0.505E-01	0.704E+01	0.404E+01	0.221E+01	0.126E+02	0.558E-04	0.286E-03
14277	0.539E+01	0.505E-01	0.704E+01	0.400E+01	0.221E+01	0.125E+02	0.557E-04	0.284E-03
14278	0.539E+01	0.505E-01	0.704E+01	0.396E+01	0.221E+01	0.124E+02	0.557E-04	0.281E-03
14279	0.539E+01	0.505E-01	0.704E+01	0.392E+01	0.221E+01	0.123E+02	0.557E-04	0.278E-03
14280	0.539E+01	0.505E-01	0.703E+01	0.388E+01	0.221E+01	0.122E+02	0.557E-04	0.275E-03
14281	0.539E+01	0.505E-01	0.703E+01	0.385E+01	0.221E+01	0.120E+02	0.557E-04	0.273E-03
14282	0.539E+01	0.505E-01	0.703E+01	0.381E+01	0.221E+01	0.119E+02	0.556E-04	0.270E-03
14283	0.539E+01	0.505E-01	0.703E+01	0.377E+01	0.221E+01	0.118E+02	0.556E-04	0.268E-03
14284	0.539E+01	0.505E-01	0.702E+01	0.373E+01	0.221E+01	0.117E+02	0.556E-04	0.265E-03
14285	0.539E+01	0.505E-01	0.702E+01	0.370E+01	0.221E+01	0.116E+02	0.556E-04	0.262E-03
14286	0.539E+01	0.505E-01	0.702E+01	0.366E+01	0.221E+01	0.115E+02	0.556E-04	0.260E-03
14287	0.539E+01	0.505E-01	0.702E+01	0.363E+01	0.221E+01	0.114E+02	0.555E-04	0.257E-03
14288	0.539E+01	0.505E-01	0.701E+01	0.359E+01	0.221E+01	0.112E+02	0.555E-04	0.255E-03
14289	0.539E+01	0.505E-01	0.701E+01	0.356E+01	0.220E+01	0.111E+02	0.555E-04	0.252E-03
14290	0.539E+01	0.505E-01	0.701E+01	0.352E+01	0.220E+01	0.110E+02	0.555E-04	0.250E-03
14291	0.539E+01	0.505E-01	0.701E+01	0.349E+01	0.220E+01	0.109E+02	0.555E-04	0.247E-03
14292	0.539E+01	0.505E-01	0.700E+01	0.345E+01	0.220E+01	0.108E+02	0.554E-04	0.245E-03
14293	0.539E+01	0.505E-01	0.700E+01	0.342E+01	0.220E+01	0.107E+02	0.554E-04	0.243E-03
14294	0.539E+01	0.505E-01	0.700E+01	0.339E+01	0.220E+01	0.106E+02	0.554E-04	0.240E-03

부록 II

- 기기 방사화 평가결과 데이터 (ORIGEN2) -

```

ORIGEN2 V2.2 (5-4-2002), Run on 08/11/23 at 23:56:16
1 0 RDA *RDA =====
2 0 RDA *RDA ! Activity of SA 508 (Kori#1 Reactor Vessel) !
3 0 RDA *RDA =====
4 0 RDA *RDA FLUX = 4.74E+11, IRRADIATION DAY = 14600days |
5 0 RDA *RDA CROSS SECTION LIBRARY = PWRU
6 0 CUT *CUT -1
7 0 RDA *RDA DECA Y LIB XSECT LIB VAR. XSECT
8 0 LIB *LIB 0 1 2 3 204 205 206 9 3 0 1 1
9 0 RDA *RDA PHOTON LIB
10 0 PHO *PHO 101 102 103 10
11 0 RDA *RDA Input Data Libraries Printing (0/1 = NO/YES)
12 0 LIP *LIP 0 0 0
13 0 RDA *RDA SPECIFY OUTPUT TABLE TYPE
14 0 OPTL *OPTL 6*8 5 17*8
15 0 OPTA *OPTA 6*8 5 17*8
16 0 OPTF *OPTF 6*8 5 17*8
17 0 BAS *BAS SA508 346 ton
18 0 RDA *RDA SPECIFY INPUT COMPOSITION, REMOVAL AND FEED RATE
19 0 INP *INP 1 1 -1 -1 1 1
20 0 RDA *RDA Flux Irradiation
21 0 BUP *BUP
22 0 IRF *IRF 178 4.74E 11 1 2 4 2
23 0 IRF *IRF 476 4.74E 11 2 3 4 0
24 0 IRF *IRF 860 4.74E 11 3 4 4 0
25 0 IRF *IRF 1202 4.74E 11 4 5 4 0
26 0 IRF *IRF 1484 4.74E 11 5 6 4 0
27 0 IRF *IRF 1884 4.74E 11 6 7 4 0
28 0 IRF *IRF 2197 4.74E 11 7 8 4 0
29 0 IRF *IRF 2541 4.74E 11 8 9 4 0
30 0 IRF *IRF 2637 4.74E 11 9 10 4 0
31 0 IRF *IRF 2897 4.74E 11 10 11 4 0
32 0 IRF *IRF 3361 4.74E 11 11 12 4 0
-----
21 0 IRF *IRF 3361 4.74E 11 1 2 4 0
22 0 IRF *IRF 3712 4.74E 11 2 3 4 0
23 0 IRF *IRF 4126 4.74E 11 3 4 4 0
24 0 IRF *IRF 4500 4.74E 11 4 5 4 0
25 0 IRF *IRF 4988 4.74E 11 5 6 4 0
26 0 IRF *IRF 5352 4.74E 11 6 7 4 0
27 0 IRF *IRF 5728 4.74E 11 7 8 4 0
28 0 IRF *IRF 6092 4.74E 11 8 9 4 0
29 0 IRF *IRF 6444 4.74E 11 9 10 4 0
30 0 IRF *IRF 6807 4.74E 11 10 11 4 0
31 0 IRF *IRF 7220 4.74E 11 11 12 4 0
-----
21 0 IRF *IRF 7220 4.74E 11 1 2 4 0
22 0 IRF *IRF 7583 4.74E 11 2 3 4 0
23 0 IRF *IRF 7935 4.74E 11 3 4 4 0
24 0 IRF *IRF 8295 4.74E 11 4 5 4 0
25 0 IRF *IRF 8659 4.74E 11 5 6 4 0
26 0 IRF *IRF 8975 4.74E 11 6 7 4 0
27 0 IRF *IRF 9012 4.74E 11 7 8 4 0
28 0 IRF *IRF 9382 4.74E 11 8 9 4 0
29 0 IRF *IRF 9747 4.74E 11 9 10 4 0
30 0 IRF *IRF 10154 4.74E 11 10 11 4 0
31 0 IRF *IRF 10297 4.74E 11 11 12 4 0
-----
21 0 IRF *IRF 10297 4.74E 11 1 2 4 0
22 0 IRF *IRF 10670 4.74E 11 2 3 4 0
23 0 IRF *IRF 11052 4.74E 11 3 4 4 0
24 0 IRF *IRF 11375 4.74E 11 4 5 4 0
33 0 BUP *BUP
34 0 RDA *RDA Print Calculation Results of Power Operation
35 0 TIT *TIT
36 0 HED *HED 1 CHARGE
37 0 MOV *MOV -1 1 0 1.0
38 0 OUT *OUT 12 1 0 0
39 0 END *END
    
```


18 GROUP PHOTON RELEASE RATES, PHOTONS/SECOND
BASIS=A508 346 ton

MEAN

	0.0S	178.0D	476.0D	860.0D	1202.0D	1484.0D	1884.0D	2197.0D	2541.0D	2637.0D	2897.0D	3361.0D
1.000E-02	0.000E+00	1.272E+16	1.282E+16	1.288E+16	1.290E+16	1.291E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16
2.500E-02	0.000E+00	2.622E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15
3.750E-02	0.000E+00	1.745E+15	1.745E+15	1.746E+15	1.745E+15	1.745E+15	1.745E+15	1.745E+15	1.745E+15	1.745E+15	1.746E+15	1.746E+15
5.750E-02	0.000E+00	2.542E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15
8.500E-02	0.000E+00	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15
1.250E-01	0.000E+00	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15
2.250E-01	0.000E+00	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15
3.750E-01	0.000E+00	8.258E+14	8.264E+14	8.263E+14	8.263E+14	8.264E+14	8.263E+14	8.264E+14	8.263E+14	8.263E+14	8.263E+14	8.263E+14
5.750E-01	0.000E+00	8.200E+14	8.280E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14
8.500E-01	0.000E+00	2.381E+16	2.450E+16	2.491E+16	2.508E+16	2.514E+16	2.519E+16	2.520E+16	2.521E+16	2.521E+16	2.522E+16	2.522E+16
1.250E+00	0.000E+00	6.907E+14	6.912E+14	6.917E+14	6.922E+14	6.925E+14	6.929E+14	6.932E+14	6.936E+14	6.936E+14	6.938E+14	6.942E+14
1.750E+00	0.000E+00	6.572E+15	6.572E+15	6.572E+15	6.572E+15	6.572E+15	6.572E+15	6.572E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15
2.250E+00	0.000E+00	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15
2.750E+00	0.000E+00	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14
3.500E+00	0.000E+00	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13	3.746E+13
5.000E+00	0.000E+00	6.296E+08	9.052E+08	1.258E+09	1.571E+09	1.828E+09	2.189E+09	2.471E+09	2.779E+09	2.864E+09	3.095E+09	3.505E+09
7.000E+00	0.000E+00	7.604E+07	1.367E+08	2.145E+08	2.833E+08	3.397E+08	4.194E+08	4.813E+08	5.491E+08	5.679E+08	6.188E+08	7.090E+08
9.500E+00	0.000E+00	1.231E+07	2.214E+07	3.472E+07	4.587E+07	5.501E+07	6.791E+07	7.794E+07	8.891E+07	9.195E+07	1.002E+08	1.148E+08

	0.0S	3361.0D	3712.0D	4126.0D	4500.0D	4988.0D	5352.0D	5728.0D	6092.0D	6444.0D	6807.0D	7220.0D
1.000E-02	0.000E+00	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16	1.292E+16
2.500E-02	0.000E+00	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15
3.750E-02	0.000E+00	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15
5.750E-02	0.000E+00	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15
8.500E-02	0.000E+00	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.591E+15	1.592E+15	1.592E+15
1.250E-01	0.000E+00	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15
2.250E-01	0.000E+00	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15
3.750E-01	0.000E+00	8.263E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14	8.264E+14
5.750E-01	0.000E+00	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.284E+14	8.285E+14	8.285E+14	8.285E+14	8.285E+14	8.285E+14	8.285E+14	8.285E+14
8.500E-01	0.000E+00	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16
1.250E+00	0.000E+00	6.942E+14	6.944E+14	6.947E+14	6.949E+14	6.951E+14	6.953E+14	6.955E+14	6.957E+14	6.958E+14	6.959E+14	6.960E+14
1.750E+00	0.000E+00	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.571E+15	6.572E+15
2.250E+00	0.000E+00	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15
2.750E+00	0.000E+00	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14
3.500E+00	0.000E+00	3.746E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13	3.747E+13
5.000E+00	0.000E+00	3.505E+09	3.813E+09	4.174E+09	4.498E+09	4.917E+09	5.228E+09	5.548E+09	5.855E+09	6.150E+09	6.453E+09	6.795E+09
7.000E+00	0.000E+00	7.090E+08	7.768E+08	8.562E+08	9.275E+08	1.020E+09	1.088E+09	1.159E+09	1.226E+09	1.291E+09	1.358E+09	1.433E+09
9.500E+00	0.000E+00	1.148E+08	1.258E+08	1.386E+08	1.502E+08	1.651E+08	1.762E+08	1.876E+08	1.986E+08	2.091E+08	2.199E+08	2.321E+08

	0.0S	7220.0D	7583.0D	7935.0D	8295.0D	8659.0D	8975.0D	9012.0D	9382.0D	9747.0D	1.0E+04D	1.0E+04D
1.000E-02	0.000E+00	1.292E+16	1.292E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16
2.500E-02	0.000E+00	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07	6.558E+07
3.750E-02	0.000E+00	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07	6.546E+07
5.750E-02	0.000E+00	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08	1.462E+08
8.500E-02	0.000E+00	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08	1.353E+08
1.250E-01	0.000E+00	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08	1.360E+08
2.250E-01	0.000E+00	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08	3.470E+08
3.750E-01	0.000E+00	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08	3.099E+08
5.750E-01	0.000E+00	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08	4.764E+08
8.500E-01	0.000E+00	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10	2.144E+10
1.250E+00	0.000E+00	8.701E+08	8.702E+08	8.704E+08	8.705E+08	8.706E+08	8.708E+08	8.708E+08	8.709E+08	8.710E+08	8.712E+08	8.712E+08
1.750E+00	0.000E+00	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10	1.150E+10
2.250E+00	0.000E+00	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09	7.041E+09
2.750E+00	0.000E+00	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09	1.202E+09
3.500E+00	0.000E+00	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08	3.312E+08
5.000E+00	0.000E+00	1.397E+04	3.547E+04	3.691E+04	3.837E+04	3.985E+04	4.112E+04	4.127E+04	4.149E+04	4.149E+04	4.580E+04	4.636E+04
7.000E+00	0.000E+00	1.003E+04	1.049E+04	1.094E+04	1.139E+04	1.184E+04	1.223E+04	1.228E+04	1.274E+04	1.318E+04	1.368E+04	1.385E+04
9.500E+00	0.000E+00	2.205E+03	2.306E+03	2.403E+03	2.503E+03	2.602E+03	2.688E+03	2.698E+03	2.799E+03	2.897E+03	3.006E+03	3.044E+03

	0.0S	1.0E+04D	1.1E+04D	1.1E+04D	1.1E+04D
1.000E-02	0.000E+00	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16	1.293E+16
2.500E-02	0.000E+00	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15	2.623E+15
3.750E-02	0.000E+00	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15	1.746E+15
5.750E-02	0.000E+00	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15	2.543E+15
8.500E-02	0.000E+00	1.592E+15	1.592E+15	1.592E+15	1.592E+15
1.250E-01	0.000E+00	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15	1.088E+15
2.250E-01	0.000E+00	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15	1.542E+15
3.750E-01	0.000E+00	8.264E+14	8.264E+14	8.265E+14	8.265E+14
5.750E-01	0.000E+00	8.285E+14	8.285E+14	8.285E+14	8.285E+14
8.500E-01	0.000E+00	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16	2.522E+16
1.250E+00	0.000E+00	6.970E+14	6.971E+14	6.972E+14	6.973E+14
1.750E+00	0.000E+00	6.572E+15	6.572E+15	6.572E+15	6.572E+15
2.250E+00	0.000E+00	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15	3.129E+15
2.750E+00	0.000E+00	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14	4.372E+14
3.500E+00	0.000E+00	3.748E+13	3.748E+13	3.748E+13	

부록 III

- 선량 평가결과 데이터 (PHITS) -

```

[ T-Deposit ]
title = Dose in reg mesh
mesh = reg # mesh type is region-wise
reg = 1 2
unit = 0 # unit is [Gy/source]
letmat = 0 # (D=0) mat ID for LET, 0:real mat, <0: electron for H2O
dedxfnc = 0 # (D=0) user defined multiplier, 0(no), 1, 2
material = all # (D=all) number of specific material
output = dose # total deposit energy
deposit = 0 # (D=0) 0-> total deposit dist, 1-> each process
axis = reg # axis of output
file = deposit.out # file name of output for the above axis
part = photon
# kf/name : 22
# used : main ( %) temp ( %) total ( %)
# memory : 5 ( 0) 0 ( 0) 5 ( 0)
#-----
#newpage:
# no. = 1
x: Serial Num. of Region
y: Dose [Gy/source]
p: xlin ylog afac(0.8) form(0.9)
h: x n n y(photon ),l3 n
# num reg volume photon r.err
1 1 3.4443E+06 5.9369E-02 0.0003
2 1 3.4443E+06 1.1874E-02 0.0003
3 1 3.4443E+06 5.9369E-03 0.0003
4 1 3.4443E+06 3.9676E-03 0.0003
5 1 3.4443E+06 2.9829E-03 0.0003
6 1 3.4443E+06 2.3748E-03 0.0003
7 1 3.4443E+06 1.9780E-03 0.0003
8 1 3.4443E+06 1.6971E-03 0.0003
9 1 3.4443E+06 1.4857E-03 0.0003
10 1 3.4443E+06 1.3206E-03 0.0003
11 1 3.4443E+06 1.1874E-03 0.0003
#-----
21 1 3.4443E+06 2.3661E-02 0.0003
22 1 3.4443E+06 4.7206E-03 0.0003
23 1 3.4443E+06 2.3661E-03 0.0003
24 1 3.4443E+06 1.5812E-03 0.0003
25 1 3.4443E+06 1.1874E-03 0.0003
26 1 3.4443E+06 9.4701E-04 0.0003
27 1 3.4443E+06 7.8773E-04 0.0003
28 1 3.4443E+06 6.7478E-04 0.0003
29 1 3.4443E+06 5.9079E-04 0.0003
30 1 3.4443E+06 5.2708E-04 0.0003
31 1 3.4443E+06 4.7206E-04 0.0003
#-----
41 2 4.7699E+07 5.0776E-04 0.0005
#-----
51 2 4.7699E+07 2.0310E-04 0.0005
  
```