JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical paper

16(4) : 461-472 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.461

CRUDTRAN Code 입력문 생성을 위한 GUI 개발

박제호[1,*], 조서연[1], 김정주[2], 이찬복[3]

[1]스마트파워, [2]한국수력원자력 중앙연구원, [3]한국원자력연구원

Development of the GUI for the Generation of CRUDTRAN Code Input Text

Jea-Ho Park[1,*], Seo-Yeon Cho[1], Jeong-Ju Kim[2] and Chan Bok Lee[3]

[1]SMART Power Co., Ltd. 210, Dongho-ro, Jongno-gu, Seoul 04607, Republic of Korea
[2]Korea Hydro & Nuclear Power Co., Central Research Institute, 70, 1312-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34101, Republic of Korea
[3]Korea Atomic Energy Research Institute, Yusung P.O. Box 105, Daejeon 34057, Republic of Korea

Abstract Abstract - In this study the GUI (Graphical user interface) for generating CRUDTRAN code input texts was developed. The GUI is mainly composed of two parts, the CRUDTRAN input parameters part and the part that describes the power plant information and generates the CRUDTRAN input texts. The GUI is executed by first determining the CRUDTRAN parameters, calling the relevant power plant information, and finally outputting the input texts. In order to verify the effectiveness of the GUI, input parameters were constructed using the actual maintenance history data and design data of Kori Unit 1, and the evaluation results were analyzed in detail by generating input texts for a total of six cases. The evaluation results and the measurement results using a survey meter in the SG were compared, and it was found that the predicted results were about 17~30% higher in conservatism than the measurement results. It was also found that the evaluation by considering the actual operation and maintenance period in each cycle showed more realistic results than the evaluation using the average operation and maintenance period.

Key words: CRUDTRAN, Kori Unit 1, Kori-1 nuclear power plant, Decommissioning, Chemical decontamination, Radioactive inventory

1. 서 론

원전의 운전 과정에서 냉각재는 고온고압 상태이며, 화학적으로 매우 활성화되어 계통표면과 상호작용을 통하여 부식, 침식 및 부식생성물의 계통표면 내 침적 등 여러 현상이 발생한다. 부식생성물은 온도에 의존하여 용해된 상태로 존재하거나, 용해되지 않고 크러드(Crud, Chalk River Unidentified Deposit)라는 검은 입자 물질 형태로 나타난다[1]. 부식발생률은 운전 초기에 급격히 상승하며, 시간이 지남에 따라 일정한 평형상태에 도달한다. 생성된 부식생성물은 노심 내에서 중성자 조사에 의해 방사화되며, 용해된 상태로 혹은 입자 형태로 1차 계통 전체 영역으로 이동하여 표면에 침적한다.

본격적인 원전 해체 활동을 시작하기 전 모든 주요 원자로냉각재계통(RCS, reactor coolant system)을 대상으로 화학적 제염을 수행하는 것은 부품 및 배관 내부 표면으로부

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author.** Jea-Ho Park
Tel. +82-2-3210-0650 Fax. +82-2-2232-0651 E-mail. jeaho.park@smart-nuclear.com
Received 19 July 2022 **Revised** 9 November 2022 **Accepted** 21 November 2022

터 산화 피막과 금속산화물 침적물을 제거하는 과정이다. 이를 통하여 작업자에 대한 방사선 피폭을 줄이고 방사성 폐기물량을 최소화할 수 있다[2].

2017년 7월 18일 영구정지된 국내 최초의 상용 원전인 고리 1호기 (웨스팅하우스사의 2-루프 가압경수로형 (PWR, Pressurized Water Reactor))의 경우 전계통화학제염운전 (FSCDO, Full system chemical decontamination operation)이 수행될 예정이다. 1차 계통 중 원자로압력용기 (RPV. reactor pressure vessel), 증기발생기 (SG, steam generators), 가압기 (PZR, pressurizer), RCS 배관, 원자로냉각재펌프 (RCP, reactor coolant pumps), 잔열제거계통 (RHRS, residual heat removal system) 및 화학 및 체적제어계통 (CVCS, chemical and volume control system)이 원자로냉각재계통의 제염에 포함된다. 화학물질 주입 및 제염설비들은 RHRS 반환 라인에 연결된다. 참고문헌 [3]에서는 FSCDO의 정상 및 비정상 유동 특성을 MARS (KINS 표준버전)을 이용하여 모사하였고, 비정상사건에서 냉각재계통으로부터 누출되는 유체량을 기반으로 방사능량을 추론하였는데, 화학제염실험으로 도출한 산화층제거율을 적용하였다[4].

향후 해체 단계에서 고리 1호기의 1차 계통 방사능 재고량을 추정하기 위하여, 한수원은 서베이미터를 사용하여 RCS 각 구성요소에 대한 접촉선량률을 여러 차례 측정하였다[5-7]. 그러나 측정값 사이의 편차가 크고, 또한 측정값의 불확실성이 아직 상세히 연구되지 않았다. 본 연구에서는 고리 1호기 해체 시 원자로냉각재계통에 축적된 방사능 재고량을 CRUDTRAN 코드[8,9]를 사용하여 검토하였으며, 체계적인 분석을 위하여 CRUDTRAN 입력문 생성을 위한 GUI (Graphical user interface)를 작성하였다. 이는 CRUDTRAN의 사용 편의성을 크게 증진시킬 것으로 기대한다. 즉, GUI를 구동하여 향후 해체되는 해당 발전소에 대한 입력매개변수 데이터를 호출하면, 곧바로 CRUDTRAN 코드 입력문을 생성시키고, 실행할 수 있다. 참고문헌 [10]에서는 CRUDTRAN 코드의 유효성을 조사하기 위해 예비적인 계산을 수행하였으며, 측정 결과와 비교한 바, 예측 결과가 충분한 보수성을 지닌 것으로 나타났다.

2. CRUDTRAN GUI

GUI는 Phyton 코드의 PyQt5 모듈을 이용하여 작성하였으며, 두 부분으로 구성되어 있다[11]. 먼저 CRUDTRAN 매개변수를 확정한 후 해당 발전소 정보를 호출하고, 마지막으로 입력문을 출력한다.

1. CRUDTRAN 입력 매개변수 부분
2. 발전소 정보를 입력하고, CRUDTRAN 입력문을 생성시키는 부분

2.1. CRUDTRAN 입력 매개변수 부분

CRUDTRAN 코드의 입력문 작성을 위해서는 다음과 같은 총 11가지 종류의 변수집단을 결정해야 하며, 고리 1호기의 해석에 적용한 변수값은 참고문헌 [10]에 제시되어 있다.

(1) Calculation parameter
(2) Plant operating condition
(3) Output print option
(4) Initial conditions
(5) Option
(6) Plant geometry
(7) Diffusion coefficients
(8) Radioactivity parameters

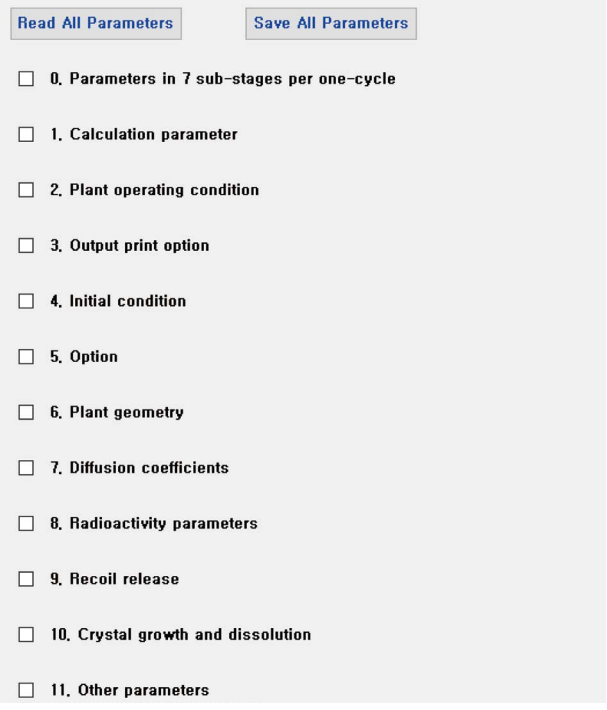

Fig. 1. CRUDTRAN input parameters.

(9) Recoil release
(10) Crystal growth and dissolution
(11) Other parameters

Fig. 1에서는 GUI 상에서 테이블 형태로 나타나는 매개변수의 항목들을 제시하였다. [Read All Parameters]와 [Save All Parameters] 버튼을 클릭하는 경우, 엑셀파일의 각 변수 항목에 해당하는 시트 모두를 업데이트하거나, 저장하는 기능을 갖추고 있다.

Fig. 2에는 매개변수의 입출력에 대한 예를 나타내고 있다. 매개변수 값(Value)은 프로그램에서 벡터로 저장되며, 엑셀파일의 해당 시트에서 불러올 수 있으며(loadExcel), 수정 후에는 새로운 엑셀파일의 해당 시트에 저장할 수 있도록 구성되어 있다(saveExcel).

동일 주기 내에서 연소 단계에 따라 변화하는 변수값에는 보론의 농도, 수산화리튬(LiOH)의 농도, 질량유량, 노심 입구 및 출구의 온도가 있으며, Table 1에 제시하였다. 노심 출력은 전 과정에서 100%로 동일하게 가정하였다. 매개변수 값(Value)은 프로그램에서 매트릭스로 저장되며, 마찬가지로 엑셀파일 해당 시트에서 불러오고, 또한 수정 후 새로운 엑셀파일의 해당 시트로 출력할 수 있도록 구성되어 있다.

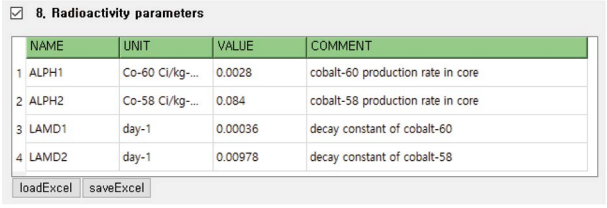

Fig. 2. Example of CRUDTRAN input parameters.

한 주기에서의 운전은 7개의 부분운전단계로 나누어지며, 각 단계의 일수는 내부적으로 계산되기 때문에, 여기에서는 회색으로 처리되어 있고, 수정되지 않는다. 맨 마지막 줄은 유지보수기간 동안의 매개변수를 나타낸다.

2.2. 발전소 정보 부분

발전소 정보에서 운전시작일, 영구정지일을 기입해 주면, 발전소 수명은 내부적으로 계산되며, 운전일수와 유지보수일수 합은 발전소 수명과 동일하여야 한다. 주기수를 기입하면, 평균운전일수 및 평균유지보수일수는 내부적으로 계산된다. 예를 들어, 고리 1호기의 발전소 정보에 대한

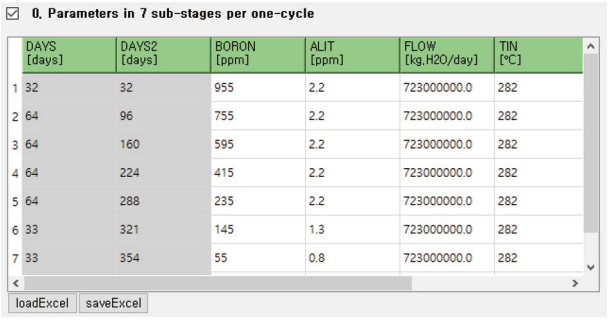

Fig. 3. Example of CRUDTRAN input parameters.

Fig. 4. Plant information.

Table 1. Parameters in 7 sub-stages per one cycle [10]

Operation duration (days)	Cumulative operation (days)	Boron concentration (ppm)	LiOH (ppm)	Flow rate (kg-H_2O day^{-1})	T_in (°C)	T_out (°C)
35	35	955	2.2	0.723×10^9	282	320
68	103	775	2.2	0.723×10^9	282	320
68	171	595	2.2	0.723×10^9	282	320
68	239	415	2.2	0.723×10^9	282	320
68	307	235	2.2	0.723×10^9	282	320
34	341	145	1.3	0.723×10^9	282	320
34	375	55	0.8	0.723×10^9	282	320
74	449	2,000	0.63	1.15×10^9	286	323.2

Table 2. Plant information variables

G_PlantStart	1978-04-29	Operation Start date (given)
G_PlantShutdown	2017-06-18	Shutdown date (given)
G_PlantLifespan	14,295	Plant Lifespan (read_only)
G_TotalOperationDays	12,010	Total Operation Days (given)
G_TotalMaintenanceDays	2,285	Total Maintenance Days (given)
G_TotalCycles	34	Total Cycles (given)
G_AveOperationDaysPerCycle	354	Ave. Operation Days per Cycle
G_AveMaintenanceDaysPerCycle	69	Ave. Maintenance Days per Cycle

프로그램 내부적인 변수의 의미를 Table 2에 제시하였다.

입력문 생성은 크게 두 가지 방법으로 분류된다. 운전일수 및 유지보수일수가 매 주기마다 동일하다고 가정하여 평균적인 값을 사용하는 경우 (A)와 전 수명기간 동안 각 주기에 대한 상세한 정보를 알고 있다면 이를 가공하지 않고 그대로 적용하는 경우 (B)가 있다.

A. 평균적인 운전 및 유지보수 일수를 사용하는 방법
- [A-1a. Read Data_PI]: 해당 발전소 정보를 입력용 엑셀 파일에 작성하고, 이를 읽어 계산하는 경우
- [A-1b. Save Data_PI_New]: GUI 상의 Plant Information 윈도우 창을 수정하여 계산하는 경우
- [A-2. Save CRUDTRAN_Input]: 마지막으로 CRUDTRAN 입력문을 생성한다.

B. 운전 및 유지보수 일수에 대한 상세 정보를 그대로 사용하는 방법
- [B. Read Data_PI_Detailed]: 발전소 운영 상세정보를 기입한 엑셀파일을 호출하여, 내부적인 계산을 수행한 후 CRUDTRAN 입력문을 생성한다.

2.3. 고리 1호기 운전이력을 적용한 입력문 생성의 예

GUI 프로그램에 내장되어 있는 평균운전일수, 평균유지보수일수 및 부분운전단계일수 등의 계산 알고리즘을 고리 1호기 데이터를 기반으로 설명하였다. 고리 1호기의 운전이력의 특징은 다음과 같다(Table 3).

- 총 수명은 1978년 4월 29일부터 2017년 6월 18일까지 14,295일이며, 운전은 12,010일(84%), 유지보수에는 2,285일(16%)이 소요되었다.
- 17주기의 유지보수기간 동안에 SG 교체가 있었다. SG 교체 후로는 1998년 9월 6일부터 2017년 6월 18일까지 6,860일 동안 가동되었으며, 운전은 5,982일(87.2%), 유지보수에는 878일(12.8%)이 소요되었다.
- 영구정지 후 수행한 마지막 유지보수를 포함하여 총 34회 유지보수가 수행되었지만, 32주기의 핵설계가 적용되었다. 즉, 두 번의 비정상사건이 있었으며, 한 번은 운전일수(143일)가 매우 짧은 31주기 때 발생했음을 알 수 있다.
- 생애 전반부에서는 각 주기의 유지보수기간이 후반부보다 상대적으로 길다.
- 25주기 후 수명연장을 위한 업무들이 수행되어 유지보수기간이 214일로 가장 길다.

고리 1호기 운전이력 특성을 고려하여, 다음과 같은 여섯 가지 경우의 입력문을 생성하였다(Table 4). 전체 생애기간에 대하여 평균적인 운전일수 및 유지보수일수를 가정하여, 32주기(핵설계 횟수) 및 34주기(유지보수 횟수) 계산하였고, SG 교체 후 후반기에 대하여 16주기 및 17주기를 계산하였다. 이외에도 각 주기의 상세한 운전일수 및 유지보수일수를 고려하여, 전생애 기간 34주기 및 후반기 17주기 경우에 대하여 계산하였다.

○ 평균운전일수 및 평균유지보수일수 계산
- 평균운전일수 및 평균유지보수일수는 보수성을 고려하여 계산하였다. 예를 들어 34주기의 경우, 영구정지일인 2017.06.18까지의 평균운전일수 계산은 평균값 353.2353 (=12010/34)의 소수점 이하를 무조건 올림하여 354일을 선택하였고, 유지보수일수는 평균값 69.2424 (=2285/33)의 소수점 이하를 무조건 절단하여 69일을 선택하였다.
- 이 경우 평균운전일수와 평균 유지보수일수를 총 합산한 값이 전 생애 기간과 일치하지 않기 때문에, 유지보수일수를 조절하여 전 생애와 일치하도록 구성하였다. 총 합산한 일수가 전체 생애 기간보다 큰 경우에는

Table 3. Maintenance history of Kori Unit 1 in Ref. [10]

Maintenance	Operation start	Maintenance start	Maintenance stop	Operation period	Maintenance period	Events
1	1978-04-29	1978-10-24	1979-01-02	178	70	
2	1979-01-02	1979-10-27	1980-01-12	298	77	
3	1980-01-12	1981-01-30	1981-05-10	384	100	
4	1981-05-10	1982-04-17	1982-06-29	342	73	
5	1982-06-29	1983-04-07	1983-06-04	282	58	
6	1983-06-04	1984-07-08	1984-10-05	400	89	
7	1984-10-05	1985-08-14	1985-11-01	313	79	
8	1985-11-01	1986-10-11	1986-12-15	344	65	
9	1986-12-15	1988-01-15	1988-07-11	396	178	Change of condenser heat pipe
10	1988-07-11	1989-03-28	1989-07-12	260	106	
11	1989-07-12	1990-10-19	1991-01-14	464	87	
12	1991-01-14	1991-12-31	1992-03-13	351	73	
13	1992-03-13	1993-05-01	1993-07-06	414	66	
14	1993-07-06	1994-07-15	1994-09-13	374	60	
15	1994-09-13	1996-01-14	1996-03-31	488	77	
16	1996-03-31	1997-03-30	1997-06-08	364	70	
17	1997-06-08	1998-06-19	1998-09-06	376	79	**Change of SG**
18	1998-09-06	1999-09-05	1999-10-29	364	54	
19	1999-10-29	2000-10-15	2000-11-18	352	34	
20	2000-11-18	2001-11-16	2001-12-12	363	26	
21	2001-12-12	2003-01-29	2003-02-28	413	30	
22	2003-02-28	2004-02-26	2004-03-21	363	24	
23	2004-03-21	2005-03-08	2005-05-10	352	63	
24	2005-05-10	2006-05-05	2006-06-10	360	36	
25	2006-06-10	2007-06-09	2008-01-09	364	**214**	**Equipment maintenance for lifetime extension**
26	2008-01-09	2008-11-20	2008-12-09	316	19	Start of continued operation
27	2008-12-09	2009-12-16	2010-01-08	372	23	
28	2010-01-08	2011-01-13	2011-02-01	370	19	
29	2011-02-01	2012-02-01	2012-03-01	365	29	
30	2012-03-01	2013-04-12	2013-10-05	407	**176**	**Change of header**
31	2013-10-05	2014-02-25	2014-04-17	**143**	51	
32	2014-04-17	2015-04-25	2015-06-07	373	43	
33	2015-06-07	2016-06-23	2016-07-30	382	37	
34	2016-07-30	2017-06-18		323		Permanent Shutdown

Table 4. Cases of CRUDTRAN evaluations

Whole lifespan: 14,295 days (1978.04.29~2017.06.18)	Second half of the lifespan: 6,860 days (1998.09.06~2017.06.18)
Averaged 32 cycles (32_376_73)	Averaged 16 cycles (16_374_58)
Averaged 34 cycles (34_354_69)	Averaged 17 cycles (17_352_54)
Detailed 34 cycles (34_Detailed)	Detailed 17 cycles (17_Detailed)

맨 끝 주기부터 유지보수일수를 하루씩 작게 하고, 총 합산한 일수가 전 생애보다 작은 경우, 맨 앞 주기부터 유지보수일수를 하루씩 크게 보정하였다.

- 이렇게 하면, Table 5에서처럼 운전일수는 실제보다 약간 늘어나고, 유지보수일수는 약간 줄어들지만, 총 생애주기는 모든 경우에 있어서 동일하다.

○ 부분 운전단계별 일수 계산

- 앞에서 설명하였듯이, 보론 농도 등 몇 가지 특성인자들이 한 주기 운전하는 동안 지속적으로 변화하기 때

Table 5. Operation and maintenance periods in cases of CRUDTRAN evaluations

Whole lifespan: 14,295 days (1978.04.29~2017.06.18)			Second half of the lifespan: 6,860 days (1998.09.06~2017.06.18)		
	Operation	Maintenance		Operation	Maintenance
32_376_73	**12,032** (=32×376)	2,263 (=31×73)	16_374_58	**5,984** (=16×374)	876 (=6×59+9×58)
34_354_69	**12,036** (=34×354)	2259 (=15×69+18×68)	17_352_54	**5,984** (=17×352)	876 (=12×55+4×54)
34_Detailed	**12,010**	2,285	17_Detailed	**5,982**	878

Table 6. Averaged operation and maintenance period for CRUDTRAN input

```
G_AveSubOperationDays = int(G_AveOperationDaysPerCycle/5.5)
G_DeviationDays = G_AveOperationDaysPerCycle - G_AveSubOperationDays*4
HalfAveSubOperationDays = int(G_DeviationDays/3)
G_DeviationDays = G_DeviationDays%3
for i in range(1,8):
  EachSubOperationDays[i] = G_AveSubOperationDays
EachSubOperationDays[1] = HalfAveSubOperationDays
EachSubOperationDays[6] = HalfAveSubOperationDays
EachSubOperationDays[7] = HalfAveSubOperationDays
if (G_DeviationDays = = 1):
    EachSubOperationDays[1] = HalfAveSubOperationDays + 1
if (G_DeviationDays = = 2):
    EachSubOperationDays[6] = HalfAveSubOperationDays + 1
    EachSubOperationDays[7] = HalfAveSubOperationDays + 1
EachSubOperationDays[8] = EachCycleMaintenanceDays[1]
```

문에, 각 주기의 운전일수를 7개의 부분단계로 나누었다.

- 한 운전주기를 5.5로 가정하였을 때, 부분단계의 시간 간격 배분은 0.5, 1, 1, 1, 1, 0.5, 0.5의 비율로 한다. 따라서 2~5 부분단계의 운전일수로는 해당 주기의 운전일수를 5.5로 나누어, 정수부분만 선택한다(~4/5.5 비율).
- 다시 해당 주기의 운전일수에서 2~5 부분단계의 운전일수의 합을 빼고(1−8/11=3/11), 이를 3으로 나누면, 몫은 개략적으로 0.5에 해당하는 값(~1/11)이며, 나머지는 0, 1, 2가 된다. 나머지 1인 경우 1단계에 하루를 더하고, 나머지가 2인 경우에는 6, 7 단계에 하루씩을 더 크게 하였다.
- 이러한 계산과정은 Python 프로그램에서는 Table 6과 같이 구성된다.

3. 결 과

3.1. CRUDTRAN 계산 결과

CRUDTRAN의 계산 결과로는 증기발생기와 노심에서의 크러드량과 노심 및 증기발생기에서의 방사성 핵종인 ^{60}Co과 ^{58}Co의 표면방사능 및 냉각재에서의 방사능 농도가 주어진다. 대부분의 결과가 초기에 급속히 증가하며, 매 주기마다 운전 시 증가하고 유지보수 시 감소하는 싸이클의 형태를 나타내나, 증기발생기에서의 크러드량과 ^{60}Co 표면 방사능의 경우, 증가하는 기울기는 점차 감소하지만 지속적으로 증가하는 형태를 보여주고 있다(Fig. 5 및 Fig. 6).

- 모든 계산 경우에 있어서 냉각수의 방사능농도 및 크러드농도(노심 및 SG)는 크기가 거의 일치하였다. 이는 주기의 수(즉, 한 주기의 길이) 혹은 평균적인 운전

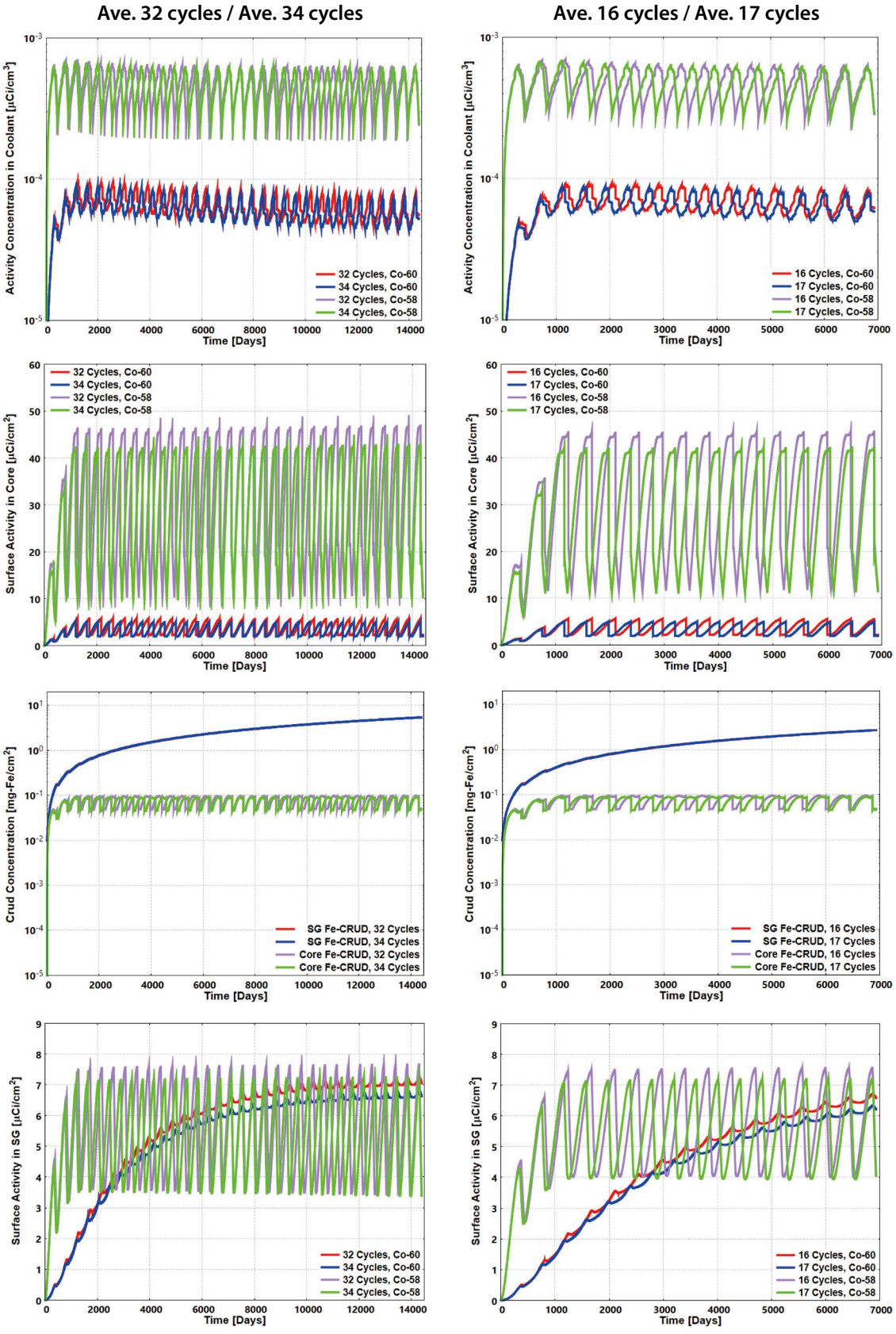

Fig. 5. Results of CRUDTRAN evaluation for Kori Unit 1.

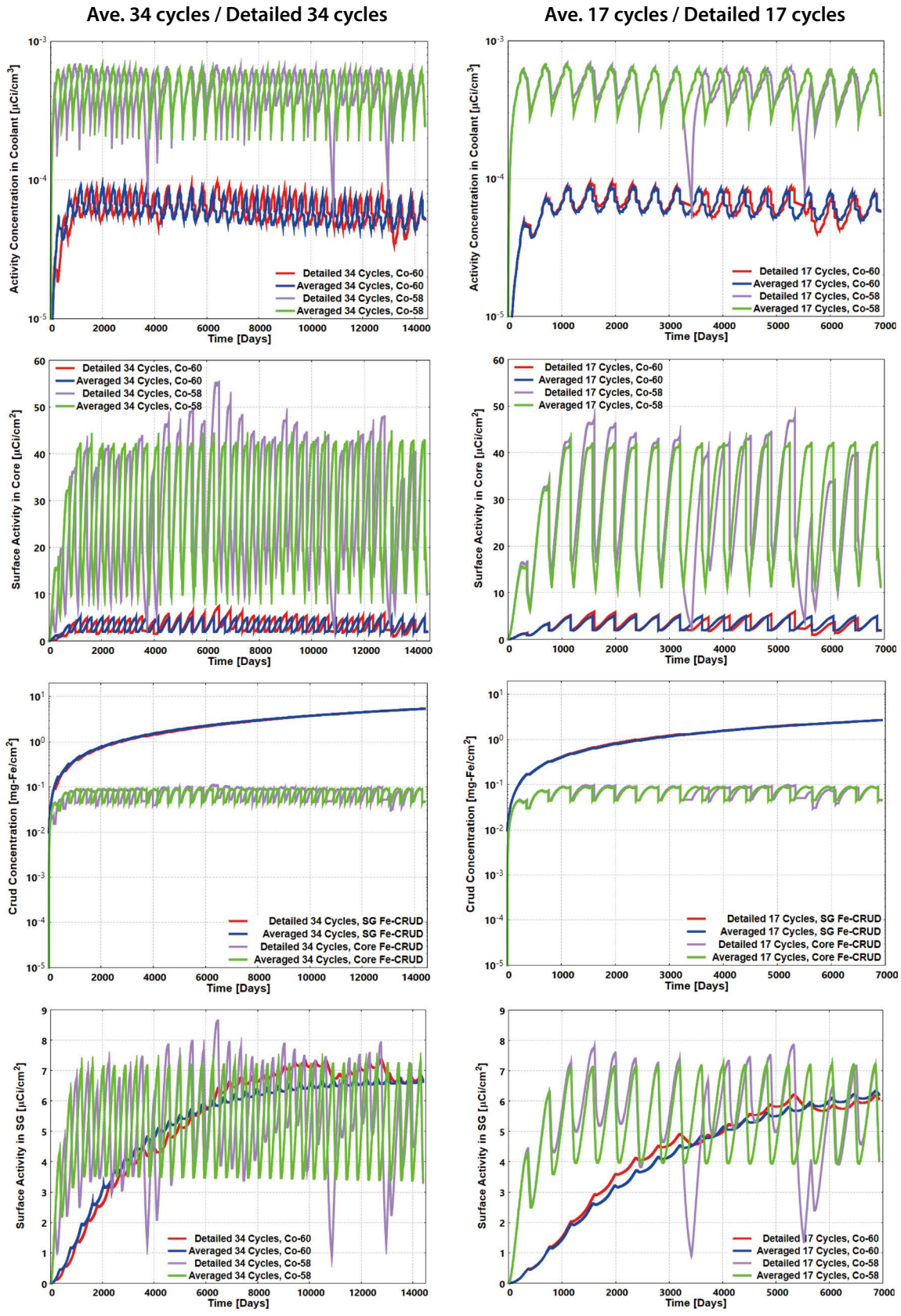

Fig. 6. Results of CRUDTRAN evaluation for Kori Unit 1.

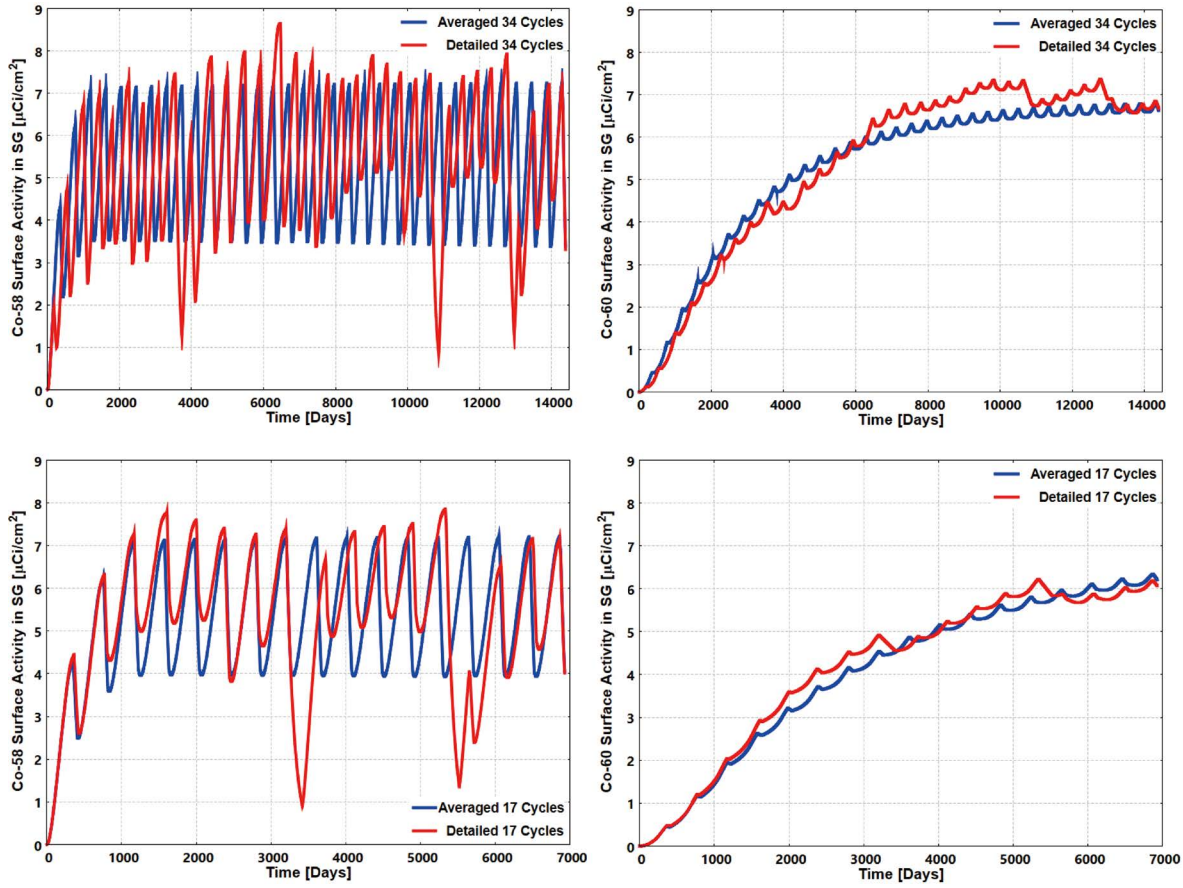

Fig. 7. Results in SG (Averaged/Detailed 34 cycles and 17 cycles).

및 유지보수일수를 이용하거나 실제적인 운전 및 유지보수일수를 이용하거나 결과는 민감하지 않다는 것을 의미한다.

- 반면 평균적인 운전 및 유지보수일수를 이용하여 평가를 수행한 경우, 노심 및 SG에서의 표면방사능은 32주기의 결과가 34주기의 결과보다 크게 나타났다. 마찬가지로 16주기의 결과가 17주기의 결과보다 크게 나타났다. 즉, 주기수가 작을수록(주기의 운전일수가 길어질수록) 표면방사능은 커진다.
- 상세 운전 및 유지보수일수를 이용하여 평가를 하였을 때, 운전기간이 긴 주기에서의 표면방사능이 평균주기를 적용한 결과를 능가하였고, 유지보수기간이 긴 주기에서는 감소하는 경향을 보였다. 특히 ^{58}Co의 감소가 두드러진다. 긴 유지보수기간의 경우(9주기 178일, 25주기 214일, 30주기 176일) ^{58}Co 방사능은 크게 떨어진다(Fig. 7).
- 고리 1호기의 경우 30주기 후 원자로 Header 교체 때문에 상대적으로 긴 유지보수시간(176일)이 있었으며, 발전소 문제로 인하여 31주기의 운전일수는 매우 짧다(143일). 이러한 실제적 상황은 34주기 후 영구정지 때까지 영향을 미치고 있다.
- 영구정지 직전에 운전기간이나 유지보수기간이 특별히 긴 경우가 발생하지 않는 한, 평균을 가정한 계산과의 차이는 크게 나지 않을 것이다. 발전소의 상세 운전이력을 알고 있다면, 상세계산을 수행하는 것이 보다 정확한 예측이 될 것이다.

3.2. 영구정지 시점에서의 결과

영구정지 시점까지의 전주기(1978.04.29~2017.06.18, 14,295일) 및 SG 교체후 후반기(1998.09.06~2017.06.18, 6,860일) 계산 결과를 살펴보면 Table 7과 같다. 노심에서의 ^{58}Co의 표면방사능 면적밀도가 SG보다 월등히 크게 나타난다.

방사능 재고량은 Table 7의 표면방사능에 SG의 내부표

Table 7. Crud concentration and surface activities after permanent shutdown of Kori Unit 1 (2017.06.18)

	SG Fe-CRUD	CORE Fe-CRUD	SG ^{60}Co	SG ^{58}Co	Core ^{60}Co	Core ^{58}Co	Coolant ^{60}Co	Coolant ^{58}Co
	(mg-Fe cm^{-2})	(mg-Fe cm^{-2})	(μCi cm^{-2})	(μCi cm^{-2})	(μCi cm^{-2})	(μCi cm^{-2})	(μCi cm^{-3})	(μCi cm^{-3})
32_376_73	5.39	9.53×10^{-2}	7.24	7.66	5.65	46.9	7.33×10^{-5}	5.62×10^{-4}
34_354_69	5.40	8.88×10^{-2}	6.80	7.25	4.95	42.9	6.89×10^{-5}	5.51×10^{-4}
34_Detailed	5.39	8.80×10^{-2}	6.85	7.17	4.92	42.6	6.92×10^{-5}	5.53×10^{-4}
16_374_58	2.69	9.40×10^{-2}	6.72	7.57	5.56	45.6	7.87×10^{-5}	5.61×10^{-4}
17_352_54	2.69	8.85×10^{-2}	6.34	7.22	4.96	42.2	7.44×10^{-5}	5.52×10^{-4}
17_Detailed	2.69	8.83×10^{-2}	6.19	7.15	4.98	42.2	7.47×10^{-5}	5.52×10^{-4}

Table 8. Radioactive inventories after permanent shutdown of Kori Unit 1 (2017.06.18)

	SG ^{60}Co	SG ^{58}Co	SG Total	Core ^{60}Co	Core ^{58}Co	Core Total
	(Bq)	(Bq)	(Bq)	(Bq)	(Bq)	(Bq)
32_376_73	2.7422×10^{13}	2.9014×10^{13}	5.6437×10^{13}	5.2743×10^{12}	4.3782×10^{13}	4.9056×10^{13}
34_354_69	2.5756×10^{13}	2.7461×10^{13}	5.3217×10^{13}	4.6209×10^{12}	4.0048×10^{13}	4.4669×10^{13}
34_Detailed	2.5946×10^{13}	2.7158×10^{13}	5.3103×10^{13}	4.5929×10^{12}	3.9768×10^{13}	4.4360×10^{13}
16_374_58	2.5453×10^{13}	2.8673×10^{13}	5.4126×10^{13}	5.1903×10^{12}	4.2568×10^{13}	4.7758×10^{13}
17_352_54	2.4014×10^{13}	2.7347×10^{13}	5.1361×10^{13}	4.6302×10^{12}	3.9394×10^{13}	4.4024×10^{13}
17_Detailed	2.3446×10^{13}	2.7082×10^{13}	5.0528×10^{13}	4.6489×10^{12}	3.9394×10^{13}	4.4043×10^{13}

면적 10,237 (m^2)과 노심의 내부표면적 2,523 (m^2)을 곱하여 구한다. 증기발생기 및 전체 노심의 방사능 재고량은 다음 표와 같다(Table 8). 비록 노심에서의 ^{58}Co의 표면방사능 면적밀도가 SG보다 높으나, 방사능 재고량은 SG에서 약간 더 큰 것을 확인할 수 있다. SG에서는 ^{60}Co와 ^{58}Co의 기여가 비슷하나, 노심에서는 ^{58}Co이 방사능 재고량에 있어서 더 주요한 요소임을 확인할 수 있다.

3.3. 측정치와 비교

고리 1호기의 영구정지 후 노심의 사용후핵연료와 일차계통의 냉각수는 제거되었으며, 현재 방사능의 자연붕괴가 진행되고 있다. 한수원은 서베이미터를 이용하여 주요기기 및 배관표면에서의 접촉선량율을 여러 차례 측정하였고, 선량-방사능(DTA) 환산계수 프로그램이 내장된 MicroShield 코드를 이용하여 방사능을 도출하였다. 참고문헌 [10]에 2017년 6월에 측정한 결과와 2021년 7월 7일의 결과가 제시되어 있다. Table 9에 SG에서의 방사능 및 총 방사능을 나타내었다.

Table 9. Contact dose rate and activity in major components and piping of RCS

Measured date	Activity in SG (Bq)	Total activity (Bq)
2017.06	1.91×10^{13}	2.63×10^{13}
2021.07.07	1.176×10^{13}	1.30×10^{13}

고리 1호기 해체 전에 수행하는 전계통화학제염운전 시에는 오염되지 않은 새로운 냉각재가 충수되며, 노심에서 이미 핵연료도 제거되었기 때문에, 증기발생기에서의 방사능 재고량을 비교하는 것만이 의미가 있다. 고리 1호기의 경우 17번째 유지보수기간 중 증기발생기를 교체한 이력이 있으므로 후반기 예측 결과를 활용한다.

앞 절에서 도출한 CRUDTRAN의 예측 결과를 이용하여 2021년 7월 7일까지 붕괴한 방사능을 구하면, ^{58}Co의 기여는 거의 미미해지며, ^{60}Co만이 방사능 재고량의 대부분을 차지한다(Table 10). 이는 ^{58}Co의 반감기가 70.86일로 ^{60}Co의 반감기 5.271년(1,924.85일)에 비해 상대적으로 훨씬 짧기 때문이다.

Table 10. Evaluated radioactive inventories (2021.07.07)

	SG ^{60}Co (Bq)	SG ^{58}Co (Bq)	Total (Bq)	Ratio of Eval./Measured value
16_374_58	1.49408×10^{13}	1.48394×10^{7}	1.49408×10^{13}	1.27048
17_352_54	1.40960×10^{13}	1.41533×10^{7}	1.40960×10^{13}	1.19864
17_Detailed	1.37625×10^{13}	1.40161×10^{7}	1.37625×10^{13}	1.17028

2021.07.07의 SG에 대한 측정치인 1.176×10^{13}에 비해 CRUDTRAN의 결과가 약 17~30% 정도 보수적으로 나타났다. 반면 영구정지 직후인 2017년 06월의 SG에 대한 결과를 살펴보면 계산치가 $5.0 \sim 5.5 \times 10^{13}$으로 측정치인 1.91×10^{13}보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 고리 1호기 해체시 SG를 포함한 일차냉각계통의 주요 구성기기들의 표면에서 크러드를 샘플링하여 방사성 핵종들의 조성과 크기 등의 자료를 생산할 필요가 있다. 이 자료는 원전의 운전 시 크러드 방사능을 줄이기 위한 방안을 도출하고, CRUDTRAN 코드의 예측 성능을 향상시키는 데 크게 도움이 될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 CRUDTRAN 코드의 입력문 생성을 위한 GUI를 개발하였다. GUI는 크게 두 부분, CRUDTRAN 입력 매개변수 부분과 발전소 정보를 입력하고 CRUDTRAN 입력문을 생성시키는 부분으로 구성된다. GUI의 실행은 먼저 CRUDTRAN 매개변수를 확정한 후 해당 발전소 정보를 호출하고, 마지막으로 입력문을 출력하는 방식이다. GUI의 효용성을 검증하기 위하여, 고리 1호기의 실제적인 유지보수 이력 데이터와 설계자료들을 활용하여 입력 매개변수를 구성하였으며, 총 여섯 가지 경우의 입력문을 생성하여 결과들을 상세히 분석하였다.

평균적인 운전일수 및 유지보수일수를 가정하여, 전체 생애 기간에 대하여 32주기 (핵설계 횟수) 및 34주기 (유지보수 횟수) 계산하였고, SG 교체 후 후반기에 대하여 16주기 및 17주기를 계산하였다. 이외에도 각 주기의 상세한 운전일수 및 유지보수일수를 고려하여, 전체 생애 기간 34주기 및 후반기 17주기 경우에 대하여 계산하였다.

증기발생기에서의 예측 결과와 서베이미터를 이용한 측정 결과를 비교하였고, 예측 결과가 측정 결과보다 약 17~30%의 보수성을 지닌 것을 나타났다. 각 주기의 상세한 운전일수 및 유지보수일수를 고려하여 계산하는 경우가 평균적인 운전일수 및 유지보수일수를 적용한 계산 경우보다 더 현실적인 결과를 보이는 것으로 나타났다.

향후 크러드 방사능의 실제 측정자료들을 확보하게 되면, CRUDTRAN 코드 및 유사한 방사능 코드의 예측 성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20191510301310)을 받아 수행되었다.

참고문헌

1. IAEA. 2012. Modelling of Transport of Radioactive Substances in the Primary Circuit of Water-Cooled Reactors. IAEA-TECDOC-1672. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1672_web.pdf
2. Ocken H. 1999. Decontamination handbook, EPRI Report, 57-73, TR-112352. https://www.epri.com/research/products/TR-112352
3. Park JH, Cho SH, Kim JJ, Kim KY and Bang YS. 2022. Study of transient events during the full-system chemical decontamination operation of the Kori-1 nuclear power plant. *Ann. Nucl. Energy* **174**:109164. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109164
4. Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD. 2018. Field test results using contaminated specimens.
5. Kim HS. 2017. Development of RCS & equipment decontamination technology for NPP decommissioning design. Ministry of Trade, Industry and Energy. Annual Report.
6. Kim HS. 2018. Development of RCS & equipment decontamination technology for NPP decommissioning design. Ministry of Trade, Industry and Energy. Final Report.

7. Kim HS. 2021. Development of Full System Decontamination Demonstration Technology for Light-Water Nuclear Power Plant. Ministry of Trade, Industry and Energy. 3rd year 2nd progress check meeting.
8. Lee CB. 1990. Modeling of corrosion product transport in PWR primary coolant. PhD Thesis, Nuclear Engineering Department, MIT. http://hdl.handle.net/1721.1/13984
9. Lee CB. 2002. Evaluation of CRUDTRAN Code to Predict Transport of Corrosion Products and Radioactivity in the PWR Primary Coolant System. International Conference on Water Chemistry in Nuclear Reactors Systems, 22-26 Avignon, France. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/056/34056182.pdf?r=1
10. Park JH, Cho SH, Kim JJ and Lee CB. 2022. A Study on the Assessment of the Radioactivity Inventory Deposited in the Reactor Coolant System during the Decommissioning of Kori Unit 1. *J. Radiat. Ind.* **16**(1):81-92. https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.1.81
11. Harwani BM. 2018. Qt5 Python GUI Programming Cookbook: Building responsive and powerful cross-platform applications with PyQt, Packt.