JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical article

17(4) : 501-508 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.501

경주 중저준위방폐물 처분시설 내 셀룰로오스 함유 방폐물 처분가능 총량 도출을 위한 스웨덴 SFR 처분시설 사례 분석

하재철[1,*], 강명구[1], 최세호[1]

[1]한국원자력환경공단 중저준위기술팀

A Case Study of SFR Disposal Facility in Sweden to Derive the Total Disposable Amount of Radioactive Waste Containing Cellulose in Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal Facility in Gyeongju

JaeChul Ha[1,*], MyungGoo Kang[1] and SeHo Choi[1]

[1]LILW Technology Team Korea Radioactive Waste Agency, Chunghyochung-gil-19, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

Abstract There are various factors that have a negative impact on safety over a long period of time after the closure of a radioactive waste disposal facility. In particular, it is important to limit substances that accelerate radionuclide migration while inhibiting adsorption between radionuclides and the subsurface medium. Through this study, a method for deriving a quantitative criteria evaluation method is proposed for cellulose among materials that accelerate the movement of these radionuclides after closure of the disposal facility. Since Sweden's SKB is representative worldwide for preparing criteria for cellulose in disposal facilities, it analyzed Sweden's acceptance criteria method and presented a method that can be applied domestically. The decomposition characteristics of cellulose and the adsorption and dissolution characteristics of ISA among degradation products were reviewed, and quantitative analysis of cement materials that create a high pH environment favorable for cellulose decomposition was also included. In addition, the total amount of the finally disposable cellulose material can be derived by using the volume information of the waste containing the cellulose material. Through this methodology for calculating the total amount of cellulose, it is expected that subsequent studies will be conducted to secure data reflecting the environmental conditions of radioactive waste disposal facilities in Korea. In addition, it is expected to be utilized as a good method to evaluate the impact of other complexing agents other than cellulose and to suggest the amount of disposal.

Key words: Radioactive waste disposal facility, Waste acceptance criteria, Waste containing cellulose, ISA characterization, Cellulose degradation

1. 서 론

현재 국내에는 경주 중저준위방폐물 처분시설이 운영되고 있다. 국내 처분시설을 운영하고 있는 한국원자력환경공단은 안전성과 관련한 항목들에 대하여 기준을 마련하고 방폐물 인수 시 기준에 부합하는지 엄격하게 검사

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Jaechul Ha
Tel. +82-54-750-4230 Fax. +82-54-750-4249 E-mail. jcha@korad.or.kr

Received 12 September 2023 **Revised** 2 November 2023 **Accepted** 3 November 2023

를 하고 있다[1]. 이러한 인수기준은 과학기술적인 근거를 토대로 수립되었으며, 새로운 기술 이슈들이 제기될 때마다 진화해 왔다. 방폐물 처분시설의 안전성 측면에서 큰 주제 중 하나는 처분시설 폐쇄 후 폐기물 포장물 내에 있는 방사성 핵종이 지하수에 용해되어 이동하는 현상이다. 이는 방사성 핵종의 외부 누출을 의미하고 결국에는 인간 환경에 대한 피폭으로 귀결되기 때문이다.

방사성 핵종의 이동에 영향을 미치는 인자는 다양하다. 이들 인자들은 크게 두 가지 경우로 나눌 수 있는데, 첫째로는 방폐물 포장물 내에 방사성 핵종과 같이 존재하면서 핵종과 직접적으로 결합/반응을 일으켜 핵종의 이동 특성을 변화시키는 인자이다. 두 번째로는 방사성 핵종 이동 경로에 존재하는 매질로써 핵종 흡착을 통해 이동을 지연시키는 인자이다. 이들 중 본 연구는 방사성 핵종과 직접적으로 결합작용을 통하여 방사성 핵종의 특성을 변화시키는 물질을 대상으로 하였다. 방사성 핵종과 직접적으로 결합하여 핵종의 매질 내 흡착력을 떨어뜨려 방사성 핵종의 외부 유출을 가속화시키는 대표적인 물질로서 킬레이트제 화합물이 있다[2]. 킬레이트제 화합물은 일찍부터 위해성이 알려져 각 국가별 처분시설에서 킬레이트제에 대한 인수기준이 마련되어 있다[3-6]. 킬레이트제와 유사한 기작으로 방사성 핵종과 결합하여 핵종의 흡착력을 떨어뜨리는 물질로 이소사카린산(Isosacharinic acid, ISA)이 있는데, 이 물질은 최근 처분시설 안전성 측면에서 큰 이슈가 되고 있다. ISA 영향에 대해서도 국외에서는 1970~80년대부터 연구가 시작되었으나[7], 방폐물 관리의 위해성 측면에서 인수기준으로 제도화하여 관리되고 있는 국가는 현재 거의 없는 상황이다.

ISA는 셀룰로오스 물질의 분해산물로써 높은 pH와 혐기 조건에서 생성이 된다[8]. 따라서 처분시설 내 폐기물 관리 관점에서는 ISA에 대한 직접적인 기준이나 정량적 제한의 어려움이 있으며, 간접적으로 ISA로 분해되기 전 물질인 셀룰로오스 함유량을 기준으로 관리하는 것이 더 적절한 접근이다. 2000년대 들어서면서 스웨덴 SFR 처분장에 ISA의 원 물질인 셀룰로오스에 대한 처분총량 개념의 인수기준이 도입되었고[5], 미국에서는 반웰 처분장에 ISA 물질의 원 물질인 셀룰로오스를 규제하고 있다[3].

국내에서도 현재는 셀룰로오스 물질에 대한 제한을 특별히 두고 있지는 않지만, 장기 안전성 측면에서 ISA 영향에 대한 관심은 높아지고 있다. 따라서 우리나라 역시 이에 대한 확인은 필요해 보인다. 국내 처분환경을 고려하여 방폐물 처분시설 내 ISA의 영향 평가 및 정량적 기준 도출을 위하여, 기술적 요인에 대한 체계가 확실한 스웨덴 SKB 사례를 분석하여 국내 셀룰로오스 함유 방폐물 인수기준 도출을 위한 방법을 고안하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 스웨덴 SFR 처분시설 운영현황

스웨덴 SKB에서는 Forsmark에 위치해 있는 중·저준위 폐기물 처분시설(SFR, Slutförvaret För kortlivat Radioaktivt avfallf)을 운영하고 있으며, 이 처분시설은 해저 동굴식 처분장으로 해수면으로부터 60미터 아래에 굴

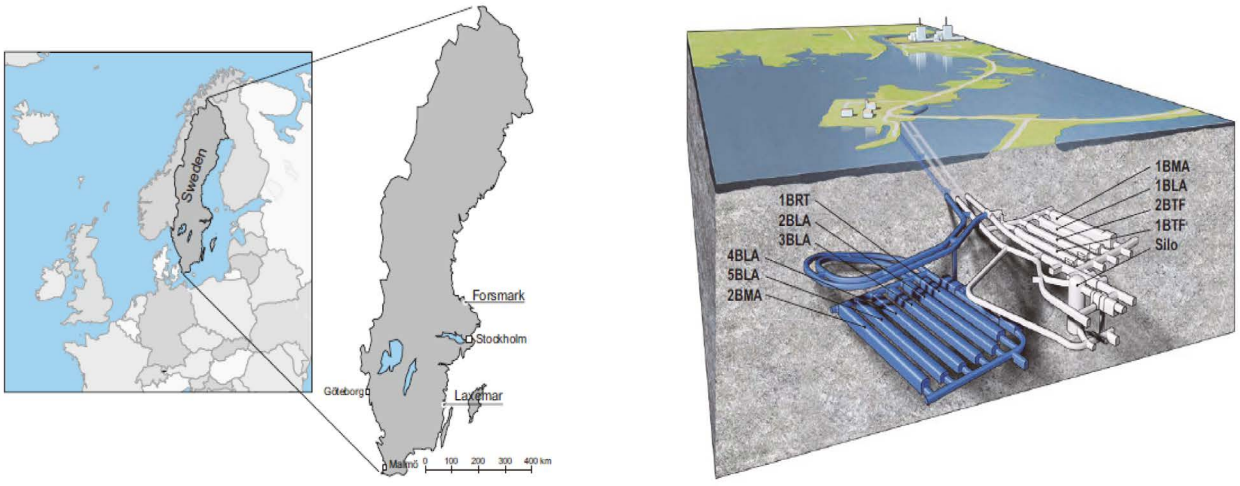

Fig. 1. Location and aerial view of the Swedish disposal facility.

착되어 1988년부터 운영되어 왔다. 처분장은 4개의 처분 터널(1BMA, 1BLA, 1-2 BTF)과 1개의 수직 사일로로 구성되어 방폐물을 처분하고 있다. 하지만 발전이 중단된 바르세백(Barsebäck) 지역 발전소 2기의 해체와 기존 원자력 발전소의 연장 가동으로 인하여 중·저준위 방폐물 양이 증가할 것으로 예상되어 6개의 처분고(1BRT, 2-5 BLA, 2BMA)가 추가 운영 예정이다(Fig. 1)[9].

SFR1 처분장에는 총 63,000 m^3의 처분 공간이 확보되어 있으며 연간 1,000 m^3의 방폐물 처분이 가능하도록 계획되어 있다. 또한, SFR3 처분고가 완공될 경우 대략 108,000 m^3의 처분 공간이 추가 확보되어 현재 SFR1의 두 배에 가까운 여유 공간이 확보되어 중·저준위 방폐물을 처분할 것으로 예상된다[10]. 이 중 특히 중·저준위 방폐물 처분고인 1BMA, 사일로, 1BTF에 킬레이트제가 함유된 폐수지, 농축폐액 등의 방폐물과 오염된 종이류, 목재류 및 면류와 같은 잡고체 폐기물에 함유된 상당량의 셀룰로오스를 처분하고 있다[11]. 이러한 유기착화제 관리를 위해 Table 1과 같이 처분고별 유기착화제 함유 방폐물을 별도 표기 후 질량을 측정해 셀룰로오스 발생량을 계산하고 있다[11].

SKB에서는 SFR 처분시설 내 셀룰로오스 물질의 처분 가능 총량 예측을 위해, ISA 흡착 특성 실험, 처분장의 콘크리트 공극 부피 및 질량 계산, 분해율 실험, 수율 값 등의 항목을 도출하였다. 셀룰로오스는 높은 pH 조건에서 ISA로 분해된 후 착화제로서 핵종과 결합 작용하기 전의 지하수에 용해된 상태로 존재한다. ISA가 생성된 후 일부는 흡착이 되고 일부는 지하수에 용해된 상태로 존재하게 되는데, SKB는 이러한 ISA 특성을 실험을 통해 확보하였다[12]. 본 연구에서는 이러한 SKB 사례를 토대로 셀룰로오스의 총량 도출에 필요한 각 인자별 의미와 내용을 분석하였다.

2.2. ISA 흡착 특성

셀룰로오스 처분용량 산출을 위해서는 셀룰로오스의 분해산물인 ISA가 핵종과 흡착하기 이전 단계에서의 고유 흡착특성에 대한 분석이 이루어져야 한다[11,13]. 높은 pH 조건에서 셀룰로오스의 분해산물로 생성된 ISA가 착화제로 작용하는 정량적인 양의 도출을 위해 ISA의 흡착등온 곡선이 필요하다. ISA 흡착등온 곡선은 분해되어 생성된 ISA가 지하수에 용해되는 과정에서 지하 매질에 흡착이 되면서 용해 평형을 이룬 상태를 나타내며, 실험을 통해 도출할 수 있다.

Fig. 2와 3은 ISA가 매질에 흡착된 농도와 용해 평형 상태의 관계를 나타내고 있으며, 흡착평형 그래프는 식 (1)과 같이 도출할 수 있다[14]. 이를 통해 최초 생성된 ISA의 양을 역산하여 추정할 수 있기 때문에 초기의 셀룰로오스 처분량을 산정하는데 중요한 인자로 작용한다.

Table 1. Waste management chart for 1 and 2 BMA repository on the SFR disposal facility

Waste package	Type of packaging	Number anticipated at closure that contain cellulose		Waste conditioning	Cellulose (kg package^{-1})
1 and 2BMA		**1BMA**	**2BMA**		
B.23	Steel and concrete lid	33	0	Concrete	44
B.23:Dsec	Steel and concrete lid	0	122	Concrete	44
C.01_cell	Steel	61	0	Cement	20.5
C.23	Concrete	63	98	Concrete	30
F.17_cell	Concrete	195	0	Bitumen	4.3
F.23_C	Concrete	57	0	Concrete	29
F.23_S	Steel and concrete lid	220	250	Concrete	150
O.01_cell	Concrete	278	0	Cement	20.5
O.23	Concrete	509	100	Concrete	30
R.23_C	Concrete	338	0	Concrete	11
R.23_S	Steel and concrete lid	172	96	Concrete	44
S.21	Steel	488	0	(Concrete between inner and outer containment)	7.9
S.23	Concrete	113	605	Concrete	29

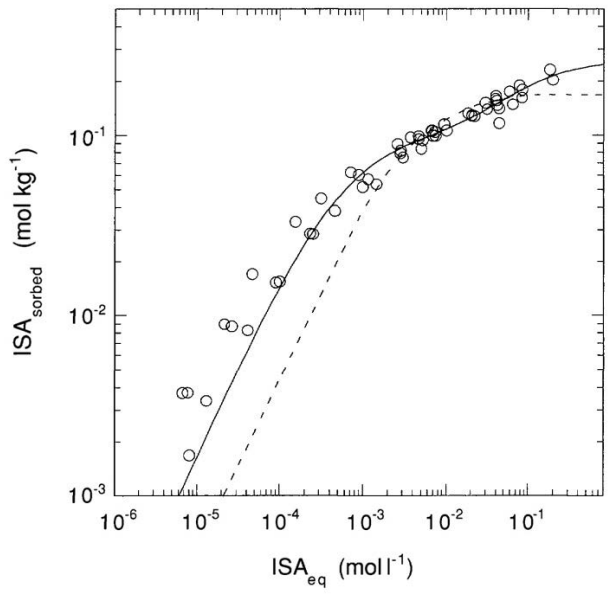

Fig. 2. Sorption isotherm of a-ISA on Portland cement at equilibrium.

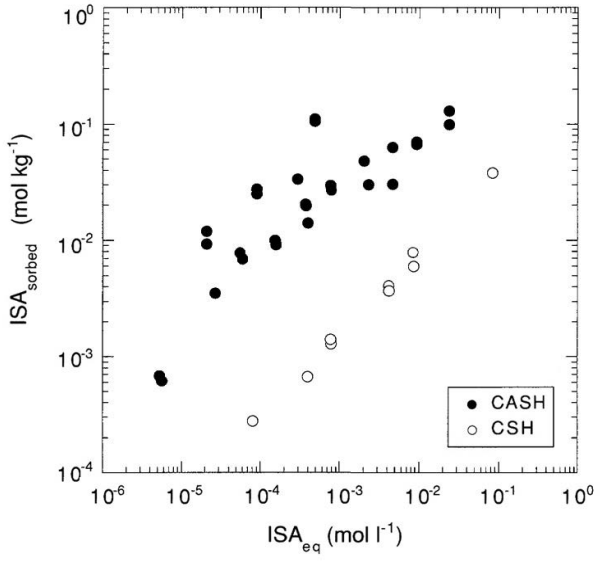

Fig. 3. Sorption isotherm of a-ISA on CASH- and CSH-phases at 13.3.

$$[ISA]_{sorbed} = \frac{K_1 \cdot q_1 \cdot (ISA)_{eq}}{1 + K_1 \cdot (ISA)_{eq}} + \frac{K_2 \cdot q_2 \cdot (ISA)_{eq}}{1 + K_2 \cdot (ISA)_{eq}} \quad (1)$$

$[ISA]_{sorbed}$: 평형상태에서 매질에 흡착된 ISA의 농도 $(mol\ kg^{-1})$

K1: 초기 반응 시 ISA의 흡착 친화도 상수 = 1,730 L mol^{-1}

q1: 초기 반응 시 ISA의 흡착 가능량 = 0.1 mol kg^{-1}

K2: 후기 반응 시 ISA의 흡착 친화도 상수 = 12 L mol^{-1}

q2: 후기 반응 시 ISA의 흡착 가능량 = 0.17 mol kg^{-1}

$[ISA]_{eq}$: 평형상태에서 지하수에 용해된 ISA의 농도(M)

또한, 식 (2)를 통해 수화 시멘트에 흡착되는 ISA의 양을 계산할 수 있다.

$$[ISA]_{sorbed} = \frac{([ISA]_{in} - [ISA]_{eq}) \cdot V}{m} \quad (2)$$

$[ISA]_{in}$: 초기 ISA의 농도 $(mol\ L^{-1})$

V: 총 공극 부피(L)

m: 콘크리트를 구성하고 있는 수화 시멘트의 총량(kg)

처분시설에서 높은 pH 조건을 조성하는 주요 원인은 시멘트이다. 식 (1)과 식 (2)의 관계를 통해 시멘트와 ISA의 흡착, ISA의 평형의 관계를 나타내는 식 (3)을 도출할 수 있다. 실험을 통해 평형상태의 ISA 농도를 구하고 수화 시멘트의 양과 부피를 도출하면 최초 발생한 ISA의 양을 얻을 수 있다.

$$[ISA]_{in} = [ISA]_{eq} + \frac{m}{V} \cdot \left(\frac{K_1 \cdot q_1 [ISA]_{eq}}{1 + K_1 [ISA]_{eq}} + \frac{K_2 \cdot q_2 [ISA]_{eq}}{1 + K_2 [ISA]_{eq}}\right) \quad (3)$$

2.3. 총 콘크리트 공극 부피와 질량

SKB에서는 셀룰로오스 제한 총량을 계산하기 위해 SFR 처분장을 구성하는 시멘트 총량을 산출하였다[11]. 셀룰로오스에서 ISA로 분해되는 데에 최적의 조건은 높은 pH 상태로, 시멘트에서 기인하는 Ca^+, K^+ 등의 성분이 지하수에 용해되면서 높은 pH 환경이 조성된다. 이에 대한 예측, 평가를 위해서, 처분시설을 구성하는 시멘트 공극의 총 부피와 질량 분석이 필요하다. 시멘트 환경을 이루는 구성요소에는 처분고의 구조물, 그라우팅, 콘크리트 용기, 시멘트 고화 폐기물, 콘크리트 폐기물 등으로 아래 Table 2에서 도출한 밀도와 공극률을 활용할 수 있다. 처분고 구조물의 경우 처분고별 구성하는 재료에 차이가 있을 수 있기 때문에 이를 고려하여 콘크리트 총량을 계산하여야 한다.

공극 부피의 경우 아스팔트 처리된 이온교환수지 폐기물과 고화매질로 사용한 콘크리트/시멘트를 제외하고 15%로 계산해 전체 시멘트의 부피를 계산하였으며, Table 2를 고려해 1 BMA, 1-2 BTF, 사일로에 대하여 총 시멘트

Table 2. Definition of concrete properties of SFR repository in Sweden

Parameter	Component	Value
Mass of hydrated cement in concrete ($kg\,kg^{-1}$)	Concrete conditioning for scrap metal and refuse	0.38
	Cement conditioning for other waste types	1
Mass of hydrated cement in concrete ($kg\,m^{-3}$)	Construction concrete	515
	Concrete packaging	515
	Silo/BMA grout	691
	BTF grout	528
Porosity (%)	Construction concrete	15
	Concrete packaging	15
	Steel packaging	0
	Silo conditioned waste	15
	BMA conditioned waste	15
	Forsmark bitumen-conditioned waste	0
	BTF concrete/cement conditioning	20
	BTF ion-exchange resins	40
	Other BTF wastes	0
Bulk density ($kg\,m^{-3}$, applied to BTF)	Cement conditioning	2,000
	Concrete conditioning	2,000
	Concrete waste	2,300
	Ion-exchange resins	1,000

Table 3. Total amount of cement and void volume in 1 BMA

Hydrated cement, kg				Pore and void volume, m^3			
Waste packages	Construction concrete	Grout	Total	Waste packages	Construction concrete	Grout	Total
6.31×10^6	2.12×10^6	2.11×10^6	1.05×10^7	3.08×10^3	6.19×10^2	2.77×10^5	1.49×10^4

및 공극 부피를 계산하였다[12]. 이 중 1 BMA 처분고를 대표 사례로, Table 3에 정리하였다.

2.4. 셀룰로오스 분해율 및 ISA 수율

SKB에서 셀룰로오스 분해율을 구하기 위해 인용한 실험은 인공 시멘트 공극수 조건에서 4가지 셀룰로오스 물질(Aldrich cellulose, Cotton, Paper, Tela tissue)을 12년 동안 분해한 실험이다[14]. 이 실험은 현재까지 수행된 셀룰로오스 분해실험 중 가장 장기간 수행되었으며, pH, 존재하는 양이온, 온도 및 산화환원 조건이 고려되었다. 또한, 대부분의 셀룰로오스 분해실험이 제한된 짧은 기간 동안 고온에서 수행 후, 결과에 처분시설 조건 및 시간 척도를 외삽하여 결론을 도출한 반면에, 본 실험은 비교적 장기간 실험을 진행해 결과 값을 얻음으로써 외삽 예측 모델의 불확실성을 상대적으로 최소화 했다고 판단할 수 있다. SKB에서는 4가지의 셀룰로오스 물질 중 Tela tissue 데이터를 셀룰로오스 분해 예측의 기본 물질로 적용하였는데[11], tela tissue를 선택한 이유와 근거에 대해서는 SKB 보고서 상에서는 별도로 명시하고 있지 않다. 다만, tela tissue 물질이 셀룰로오스를 함유한 방폐물과 가장 유사한 물질로 판단하여 적용하였을 것으로 미루어 짐작해 본다.

$$(celdeg)_t = 1 + e^{-k_h t}\left[\frac{k_1}{k_t} \cdot (G_r)_0 \cdot (1 - e^{-k_t t}) - 1\right] \quad (4)$$

$(celdeg)_t$ = 셀룰로오스 분해율

k_h = 중간사슬 절단(mid-chain scission) 표준상수

k_1 = 감속박리 반응(peeling off reaction) 비례상수

k_t = 정지반응(stopping reaction) 상수

Table 4. Summary of pH changes at SFR disposal facilities

pH	Date after closure (yr)								
	1BMA-cement		1BMA-Bitumen		1BLA	1BTF Ash section	2BTF	Silo	
	Waste	Wall	Waste	Wall				Waste	Wall
13.0	2000	2000	2000	2000		2000	2000	2000	2000
12.5	7000	6000	7000	8000	2000	4000	7000	26000	34000
12.0		22000		22000	8000				
11.5		58000		50000	9000				
10.5					9200				
9.0					11000				
7.5					21000				

※ Areas predicted to remain unchanged for 100,000 years or more are grayed out.

Table 5. Reduction factor and no effect concentration of RNs for ISA

Radionuclide (oxidation state)	No-effect concentration for ISA	Reduction factor for ISA*
Ag(I)	No effect expected for ISA (see Table 3-3 for conservative values)	1
^{14}C, carbonate species	Isotope exchange, no effects expected	1
^{14}C, CH_4, simple organics	Not relevant: $K_d = 0$ assumed	Not applicable
Ca(II), radioactive isotopes	No effects expected	1
Cd(II)	Reduction expected for [ISA] > 10 mM	10
Cl(-I), I(-I)	No effects expected	1
Cs(I)	No effects expected	1
Eu(III), Ac(III), Am(III), Cm(III), Ho(III), Pu(III), Sm(III)	Reduction expected for [ISA] > 1 mM	10
Mo(VI), Se(VI), Tc(VII)	No effects expected	1
Nb(V)	No realistic value proposed for ISA, (conservative values)	–
Ni(II), Co(II)	Isotope exchange, no effects expected	1
Pb(II), Pd(II)	Reduction expected for [ISA] > 0.05 mM	100, constant
Th(IV), Np(IV), Pu(IV), U(IV), Pa(IV), Tc(IV), Zr(IV), Sn(IV)	Reduction expected for [ISA] > 0.1 mM	100
Np(V), Pu(V)	Reduction expected for [ISA] > 1 mM	10
Pa(V)	Reduction expected for [ISA] > 0.1 mM	100
Se(-II)	Not relevant: $K_d = 0$ assumed	Not applicable
Se(IV), Po(IV)	Reduction expected for [ISA] > 0.1 mM	10
Sr(II), Ba(II), Ra(II)	Reduction expected for [ISA] > 10 mM	10
U(VI), Pu(VI)	Reduction expected for [ISA] > 0.5 mM	10

* The proposed reduction factors will increase by a factor of 10 with each 10-fold increase of [ISA] above the indicated no-effect level, except for Pb/Pd. I.e. with an indicated no-effect of 1 mM [ISA] and a reduction factor of 10, sorption values are expected to be reduced by a factor of 10 between > 1 mM to 10 mM [ISA], and by a factor of 100 between > 10 mM to 100 mM [ISA], etc

$(Gr)_0$ = 초기에 존재하는 환원 말단 그룹의 몰 분율

Glaus and Van Loon [14]가 수행한 실험에서 셀룰로오스 분해 설명을 위해 두 가지 방정식을 제시하였는데, 첫 번째는 장기 분해 속도를 제어하기 위해 중간사슬 절단

Table 6. ISA concentration limit for SFR disposal facilities

Type of material or substance	Dissolved concentration limit in WAC 3.0	Recommended dissolved concentration limit	Maximum dissolved concentration
ISA	10^{-4} M	10^{-4} M	10^{-4} M

(mid-chain reaction)을 사용한 방정식이고, 두 번째는 감속박리(peeling-off reaction)를 사용하는 방정식이다. 감속박리가 상대적으로 적용 가능성이 높은 메커니즘이지만, 중간 사슬 절단을 포함하는 방정식은 장기간에 걸쳐 서서히, 셀룰로오스가 완전 분해하기까지의 반응을 포함한다. 따라서 이러한 셀룰로오스의 실제 완전 분해 예측 시간까지 추정할 수 있기 때문에 SKB에서는 중간 사슬 절단에 대한 방정식인 식 (4)를 사용하여 시간 경과에 따른 셀룰로오스 분해율을 도출하였다[14].

ISA 수율은 다양한 셀룰로오스 분해산물 중 실질적으로 핵종 흡착제로 작용하는 ISA의 비율을 나타내는 지표이기 때문에 셀룰로오스 처분량 산출에 있어 반드시 확인이 필요한 인자이다. 일반적으로 셀룰로오스 분해 산물 중 ISA는 약 80% 이상으로 가장 많은 양을 차지하며, 포름산, 아세트산, 젖산 등은 5~10% 미만이 생성된다[15].

2.5. SFR 처분시설의 셀룰로오스 총량제한

pH 12.5 이상인 강염기성 환경에서 분해되는 셀룰로오스 특성 때문에[17], SKB에서는 2,000년 후 pH 13 (Table 4)의 범위에 해당하는 SFR 내 처분고 1BMA, 1-2BTR 및 사일로를 선정하여 안전성평가(SR-PSU)를 수행하였다[13].

1BLA 처분고의 경우 뒷채움을 제외하고 폐쇄될 예정이며 강염기 환경을 조성하기 위하여 필요한 OH-이온 방출 시멘트 양이 불충분하다. 또한, 21,000년 후에 pH가 7.5까지 낮아지는 환경을 갖고 있으며 폐기물의 총 방사성 핵종 재고량이 낮아(SFR의 총 방사성 핵종 재고의 ~0.2%) 안전성 평가 대상에서 제외하였다[15]. 처분시설의 pH 조건은 셀룰로오스가 분해되기 위한 가장 1차적인 전제조건이기 때문에 처분장에서 수용 가능한 셀룰로오스 양을 도출하는 데에 반드시 필요한 요소이다. 또한, 장기 예측평가를 위해 시뮬레이션의 수행기간을 결정하는 요소이기도 하다.

안전성 평가에서 ISA 평가는 5,000년 동안 셀룰로오스가 ~99% 분해된다는 가정 하에 계산되었다(Tela tissue 기준). 방사성 핵종의 이동측면에 있어서, Table 5와 같이 각 핵종별 ISA의 농도로부터 영향을 받는 최소 농도 조건인 no effect concentration 실험결과를 토대로 처분환경을 고려하여 보수적으로 평가한 결과 ISA에 대해 수용 가능한 최대 허용 농도는 Table 6과 같이 10^{-4} M로 도출되었다[13,17,18].

3. 결과 및 고찰

핵종이동에 직접적인 영향을 미치는 ISA를 시작으로 셀룰로오스로 환원되는 처분가능 총량 도출을 위해서 앞선 주요 인자들을 종합하면 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\text{셀룰로오스 총량} = [ISA]_{eq} + \frac{m}{V} \cdot [ISA]_{sorbed} \div \text{분해율} \div \text{수율} \times \text{ISA 분자량} \times \text{총 공극 부피} \quad (5)$$

셀룰로오스가 ISA로 완전 분해된 후 흡착을 통해 핵종 이동에 영향을 미치는 대상은 시멘트 매질에 흡착된 이후, 평형 상태에서 지하수에 용해된 ISA의 양이다. 이러한 실질적인 핵종 흡착제로 작용하는 ISA의 양을 산출하기 위해서는 용질로 작용하는 ISA의 흡착, 용해 정보가 1차적으로 필요하다. 지하 처분환경이 고려된 조건에서 셀룰로오스의 분해율과 ISA 평형농도 실험 데이터를 확보해야 하며, 이를 통해 ISA의 흡착평형 그래프를 구해 ISA의 초기 농도를 계산할 수 있다. 또한 셀룰로오스로부터 ISA 발생을 야기시키는 높은 pH 환경의 원인인 콘크리트 구조물의 공극 부피와 질량을 산정해야 한다. 이후, ISA의 분자량, 셀룰로오스 폐기물이 ISA로 분해된 후 존재할 수 있는 공간인 총 공극 부피를 활용하여 최종적으로 방폐물 처분시설 내 셀룰로오스 물질의 처분가능 총량을 구할 수 있다.

4. 결 론

국내에서 발생하는 셀룰로오스 물질을 포함하는 방폐물의 처분가능 총량 도출을 위하여 스웨덴 SKB의 인수기준 도출 사례를 분석하였다. 분석된 방법의 적용을 위해서는 현장의 실제 데이터 확보를 위한 실험과 더불어, 장기예측 차원의 모델링 평가도 병행되어야 한다. 다만, 스웨덴을 제외한 전 세계적으로도 다수의 국가들이 아직은 셀룰로오스와 그 분해산물인 ISA의 영향을 크게 고려하고 있지 않은 상황이다. 셀룰로오스 분해 후 생성되는 ISA가 핵종이동에 부정적 영향을 미치는 부분은 우리나라가 비교적 선제적으로 대비하고 있다고 볼 수 있다. 이러한 국내에서의 셀룰로오스 폐기물에 대한 핵종이동 영향성 고려는 처분시설 장기안전성 측면에 있어서 긍정적으로 보여진다. 본 연구를 통해 분석한 셀룰로오스 총량 도출에 필요한 산식은 향후 국내 중·저준위방폐물 처분시설에 처분 가능한 셀룰로오스 방폐물 총량 도출에 좋은 방법을 제시할 것으로 기대한다.

사 사

본 논문은 한국에너지기술평가원(KETEP)에서 주관하는 원전해체방폐물 안전관리기술개발사업의 “원전 해체 발생 유기착화제의 효율적 처리·처분을 위한 평가 기술 개발” 과제(과제번호: 20203210100370)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea Radioactive Waste Agency. 2022. Radioactive Waste Acceptance Criteria, WAC-SIL-2022-1.
2. IAEA Safety Standards. 2012. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive waste. SSG-23.
3. EnergySolutions. 2017. Barnwell Waste Management Facility site Disposal Criteria Chem-Nuclear Systems Barnwell office. Rev 25.
4. US DOE. 2017. Hanford Site Solid Waste Acceptance Criteria. Rev 17.
5. SKB. 2015. Safety analysis for SFR Long-term safety Main report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-01.
6. Hummel W, Anderegg G, Rao L, Puigdomenech I and Tochiyama O. 2005. Chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zrwith selected organic ligands. OECD/ NEA.
7. Haas DW, Hrutfiord BF and Sarkanen KV. 1967. Kinetic Study on the Alkaline Degration of Cotton Hydrocellulose. *J. Appl. Polym. Sci.* **11**:587-600.
8. SKB. 2017. Organic complexation in the geosphere for SR PSU.
9. Kwon S. 2016. An Introduction to the Expansion Plan of the Underground Repository of Low-and Intermediate-level Radioactive Waste In Forsmark, Sweden. *Tunn. Undergr. Space (TUS)* **26**(5):339-347. https://doi.org/10.7474/TUS.2016.26.5.339.
10. SKB. 2014. Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU. TR-14-04.
11. SKB. 2014. Assessment of complexing agent concentrations in SFR. Chapter3. R-14-03.
12. Van Loon LR and Glaus MA. 1998. Experimental and Theoretical Studies on Alkaline Degradation of Cellulose and itsImpact on the Sorption ofRadionuclides. Paul Scherrer Inst. (Switzerland). PSI-98-07.
13. SKB. 2021. Organic materials with the potential for complexation in SFR, the final repository for short-lived radioactive waste. Investigation of new acceptance criteria, R-21-03.
14. Glaus MA and Van Loon LR. 2008. Degradation of cellulose under alkaline conditions: new insights from a 12 years degradation study. *Environ. Sci. Technol.* **42**(8):2906-2911. https://doi.org/10.1021/es7025517.
15. SKB. 2001. Project SAFE. Complexing agents in SFR. R-01-04.
16. Van Loon LR and Glaus MA. 1997. Review of the kinetics of alkaline degradation of cellulose in view of its relevance for safety assessment of radioactive waste repositories. *J. Environ. Polym. Degrad.* **5**(2):97-109. https://doi.org/10.1007/BF02763593.
17. SKB. 2014. Reduction of radionuclide uptake in hydrated cement systems by organic complexing agents: Selection of reduction factors and speciation calculations. R-14-22.
18. SKB 2020. Assessment of complexing agent concentrations for the post-closure safety assessment in PSAR SFR. R-20-04.