

Development of an Optimal Program for Spent Nuclear Fuel Placement in Canister to Minimizing Total External Dose by Using View Factor Matrix

View Factor Matrix를 활용한 캐니스터 내
사용후핵연료 외부 선량 최소화 최적 배치 프로그램

2025-10-31 송제석, 이현영, 김용덕



KINGS

한국전력국제원자력대학원대학교
KEPCO INTERNATIONAL NUCLEAR GRADUATE SCHOOL

목차

01 연구 배경 및 필요성

02 View Factor Matrix 개념 및 적용

03 최적배치 프로그램 개발

04 결론 및 향후계획

1. 연구 배경 및 필요성

1.1. 사용후핵연료 캐니스터 구조 및 작업자 피폭



그림 1. 사용후핵연료 다목적 캐니스터
출처: HOLTEC 공식 홈페이지

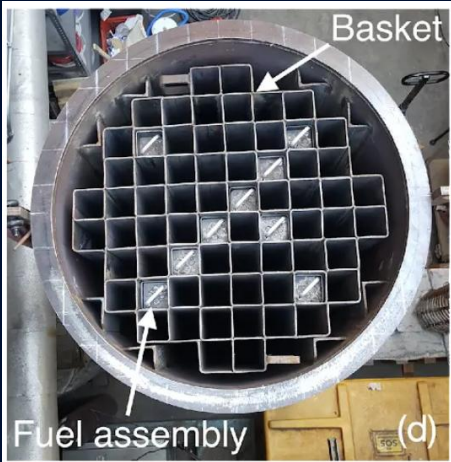


그림 2. 사용후핵연료 캐니스터 상단
출처: 서던캘리포니아대학 연구 자료

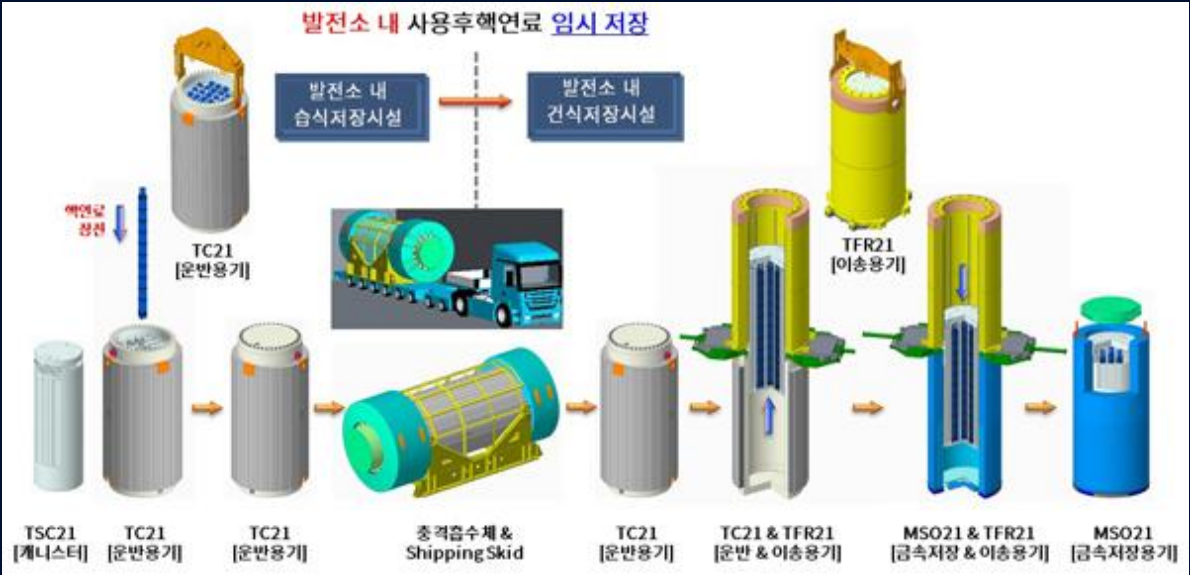
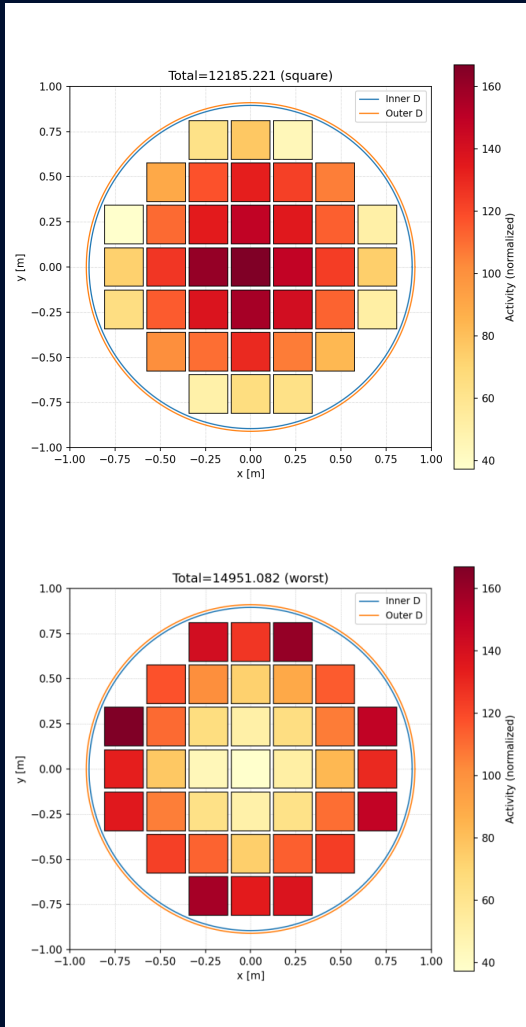


그림 3. 발전소 내 사용후핵연료 임시 저장 절차
출처: 전자신문 (두산중공업 사진 제공)

운반저장용기 열 및 방사선량 제한치	
열	피복관: ≤ 400℃ (정상) ≤ 570℃ (비정상/사고) ≤ Δ65℃ (장전 중 온도변화) NUREG-2215; ISG-11 Rev.3
	바스켓 등 기타 요소: 기능 유지 기준온도 내 NUREG-2215; ISG-11 Rev.3
방사선 방호/차폐	바스켓: ≤343℃ (정상) 중성자흡수재: ≤158℃ (정상) HOLTEC HI-STAR 80 with F-32B
	10 mSv/h (소내운반 기준) 원안위규칙 제50호 제94조
작업자 피폭한도	차량 표면으로부터 2m 기준 0.1 mSv/h 원안위고시 제2021-2호 제22조
	ALARA, 연간 작업자 피폭한도 50 mSv 10CFR 20

1.2. 사용후핵연료 배치 최적화의 필요성



- ▶ **ALARA**: 합리적으로 달성 가능한 범위에서 방사선 피폭량 최소화
- ▶ 핵연료집합체: 다른 핵연료집합체의 방사능 차단 가능
- ▶ 방사능이 높은 집합체를 중심부에 배치할 경우
총 방사능량이 낮아질 수 있음
- ▶ 캐니스터 내 집합체 위치 최적화 > 작업자 방사선 피폭량 감소!
- ▶ 방사선량 $\propto$ 방사능량 가정
- ▶ 최적 배치 대비 고방사능 집합체 외곽 배치시
 - ▶ 상대적 방사선량 약 18.5% 감소
 - * 상대적 방사선량: 각 위치별 방사능량 $\times$ 집합체 위치별 기여도 합의 총합
- ▶ 방사능이 높은 집합체일수록 위치에 따른 기여도 차이가 증가

2. View Factor Matrix 개념 및 적용

2.1. View Factor Matrix의 기본 개념

▶ View Factor

- ▶ 한 지점에서 방출된 에너지가 다른 지점에 도달하는 비율

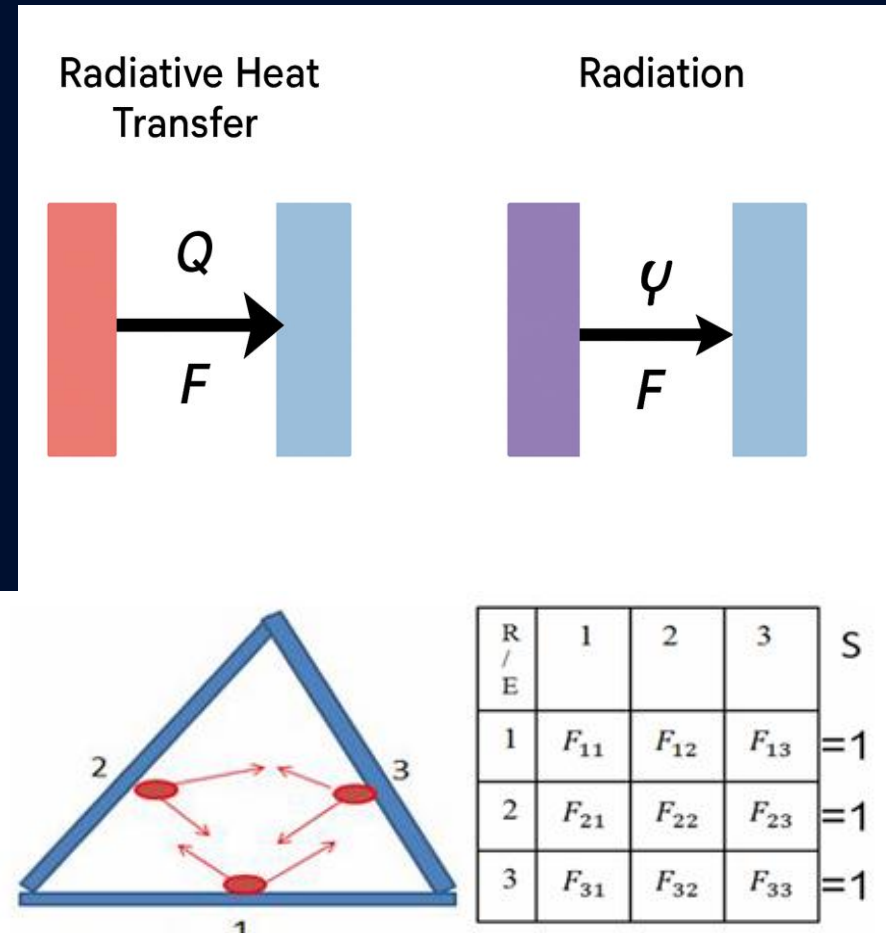
$$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

▶ View Factor Matrix

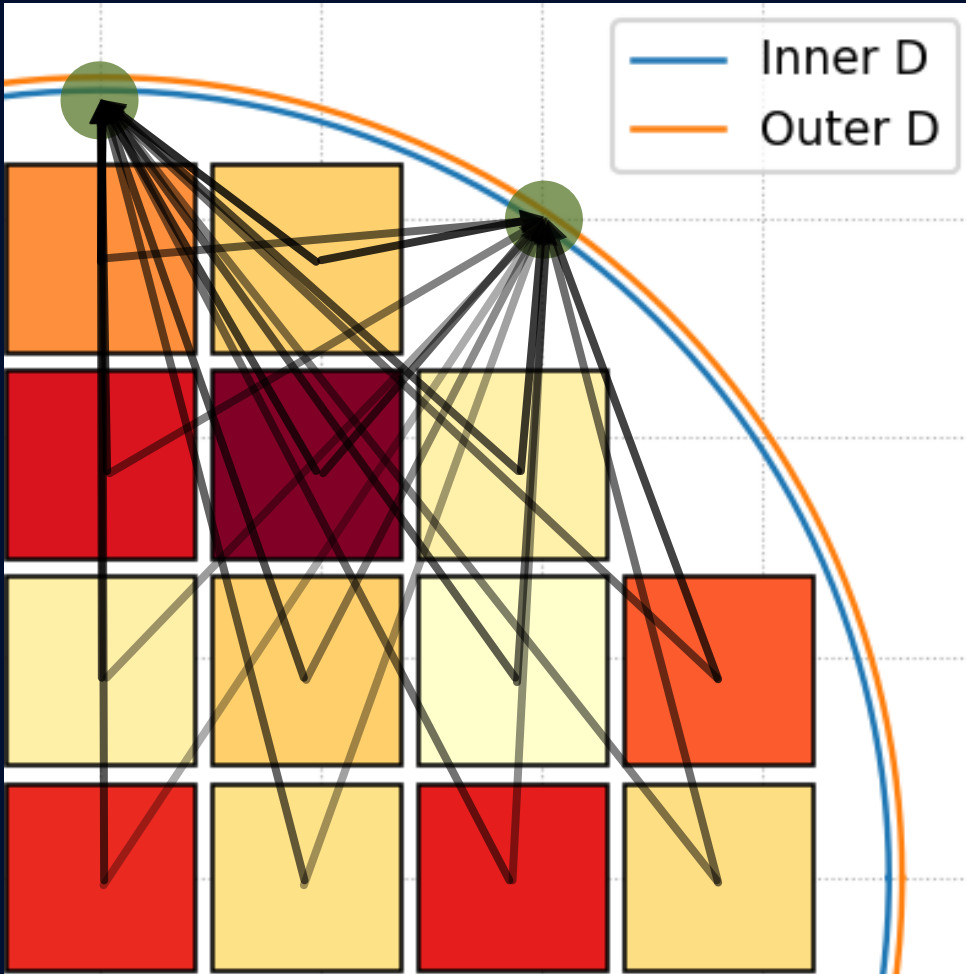
- ▶ $E = AF$ (받는 에너지량 = 각 지점당 주는 에너지량과 그 지점에서 준 에너지 비율의 곱의 총합)

▶ VFM(View Factor Matrix)

$$F = \begin{bmatrix} F_{1,1} & \cdots & F_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{1,j} & \cdots & F_{i,j} \end{bmatrix}$$



2.2. VFM 기반 최적배치 원리



▶ View Factor Matrix

▶ $\Phi = \sum_j A_{\pi(j)} S_j$

- ▶ $A_{\pi(j)}$: j 위치 핵연료의 방사능
- ▶ S_j : j 위치의 외벽 기여도
- ▶ Φ : 외벽 방사능 기여도의 총합

▶ 외벽에 도달하는 방사능량
= 각 핵연료의 방사능 X 기여도의 합

- ▶ 고방사능 연료는 중심부
- ▶ 저방사능 연료는 외곽

3. 최적배치 프로그램 개발

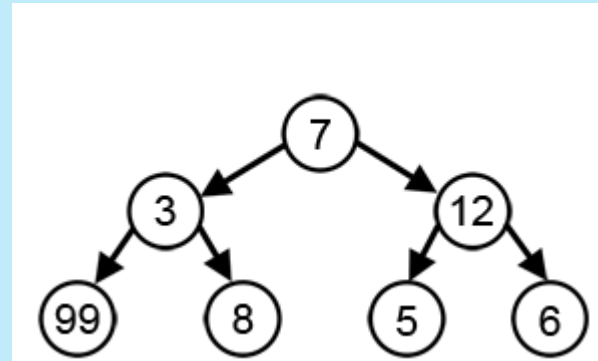
3.1. 최적배치 프로그램을 위한 주요 알고리즘 선정

Greedy 알고리즘

- ▶ 동일 순서 집합체-슬롯 매칭
 - ▶ 집합체 방사능: 내림차순 정렬
 - ▶ 슬롯 기여도: 오름차순 정렬
- ▶ $\pi(j) = \text{argsort}(-A)[j] \leftrightarrow \text{argsort}(S)[j]$
- ▶ 슬롯 기여도가 낮은 곳부터 방사능 높은 집합체를 순차적으로 배치

장점 및 단점

- ▶ 근사해를 구하나, 계산이 빠름
 - ▶ 계산시간: $N \log N$ 에 비례
- ▶ 실패할 수 있는 경우:



- ▶ 실제 최적 값에 비해 아주 높은 오차

3.1. 최적배치 프로그램을 위한 주요 알고리즘 선정

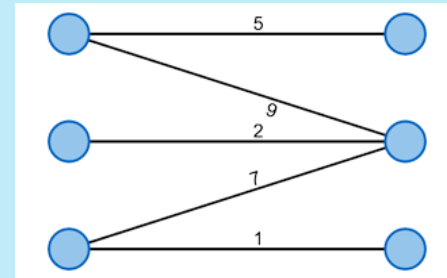
Hungarian 알고리즘

- ▶ 모든 집합체, 슬롯 조합에 대해 비용행렬 $C_{ij} = A_i S_j$ 생성
- ▶ 가능한 경우의 수들을 행렬로 변환
- ▶ 계산 전 곱할 행렬 내 원소의 최솟값만큼 모든 원소의 값 감소
- ▶ 행렬계산을 통해 가능한 모든 경우에서의 최적해 산출
- ▶ 선택 옵션으로 프로그램 내 제공

장점 및 단점

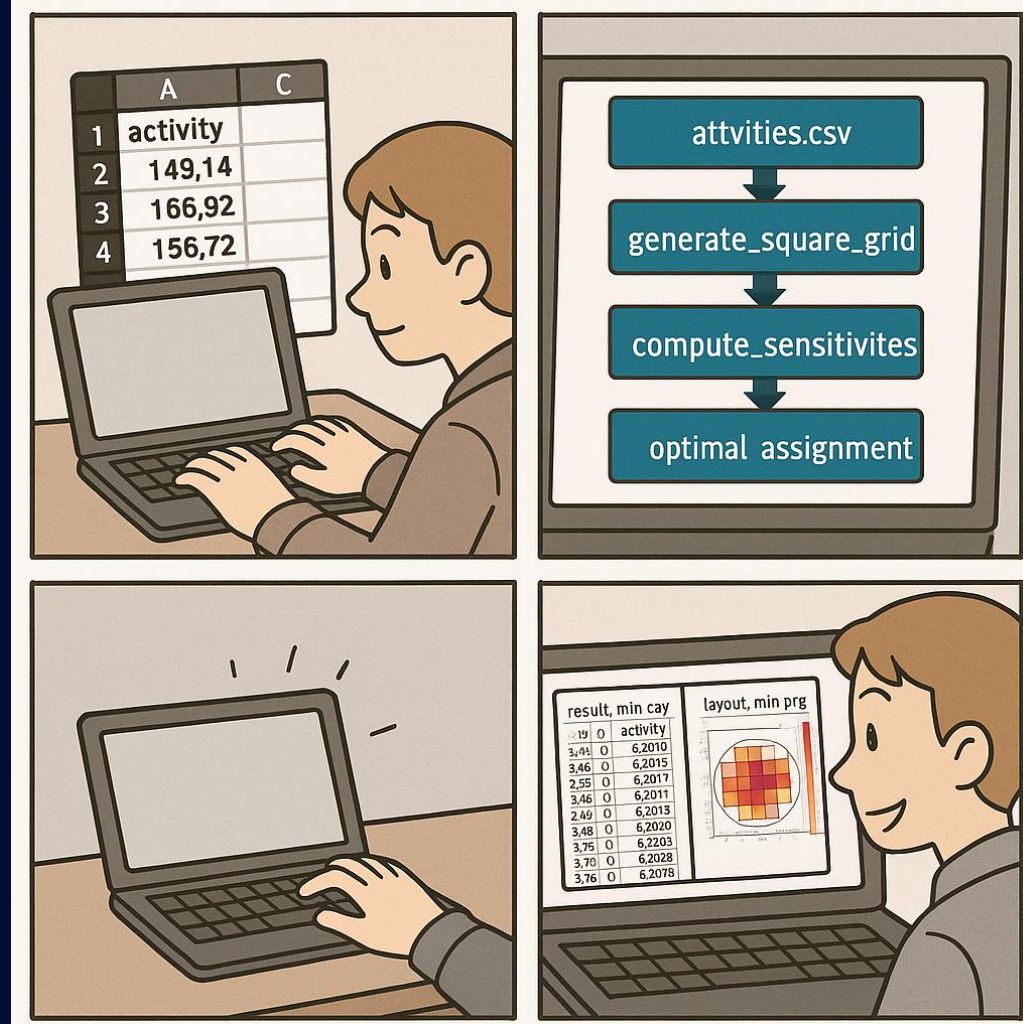
- ▶ 선형배정으로 전역 최적해 산출
(반드시 최적 값을 산출)

- ▶ 계산시간: N^3 에 비례



- ▶ MCNP보다는 매우 빠르나, Greedy 알고리즘과 비교하면 집합체 수가 늘어날수록 계산시간이 급격히 증가

3.2. 최적배치 프로그램 구조 및 제원



3.3. 프로그램 입출력 결과물 예시

	A	B	C
1	activity	layout_mode	
2	149.14	1	
3	166.92		
4	156.72		
5	135.77		
6	141.99		
7	161.24		
8	117.4		
9	134.32		
10	148.21		
11	123.83		
12	122.66		
13	125.44		
14	138.25		
15	113.89		
16	112.78		
17	109.82		
18	133.17		
19	129.92		
20	115.04		
21	105.81		
22	106.26		
23	110.74		
24	83.42		
25	101.48		
26	74.13		
27	77.23		
28	89.63		

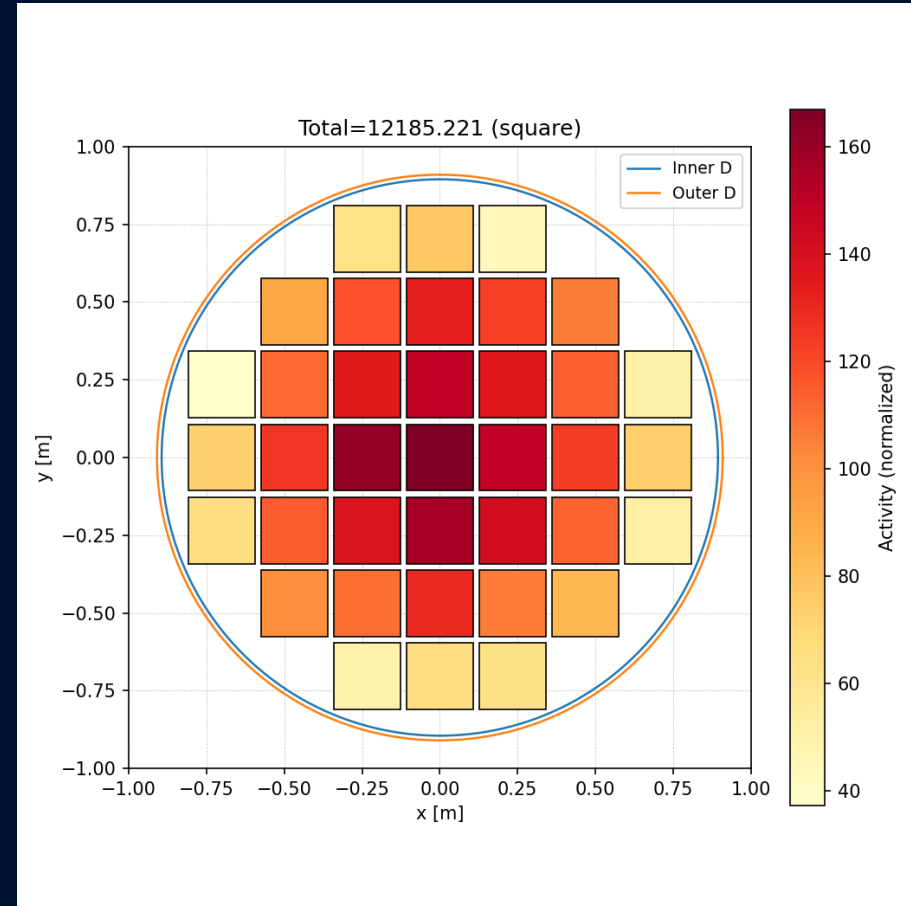
activities.csv

입력 파일

	A	B	C	D	E
1	x	y	activity	sensitivity	
2	0	0	166.92	2.159352	
3	0	-0.234	156.72	2.275761	
4	-0.234	0	161.24	2.275761	
5	0.234	0	148.21	2.275761	
6	0	0.234	149.14	2.275761	
7	-0.234	-0.234	138.25	2.408797	
8	0.234	-0.234	141.99	2.408797	
9	-0.234	0.234	134.32	2.408797	
10	0.234	0.234	135.77	2.408797	
11	0.468	0	123.83	2.742185	
12	-0.468	0	125.44	2.742185	
13	0	-0.468	129.92	2.742185	
14	0	0.468	133.17	2.742185	
15	-0.468	-0.234	115.04	2.955491	
16	0.234	-0.468	106.26	2.955491	
17	-0.234	-0.468	109.82	2.955491	
18	0.468	-0.234	112.78	2.955491	
19	0.468	0.234	113.89	2.955491	
20	-0.468	0.234	110.74	2.955491	
21	-0.234	0.468	117.4	2.955491	
22	0.234	0.468	122.66	2.955491	
23	-0.468	0.468	89.63	3.934796	
24	0.468	-0.468	83.42	3.934796	
25	-0.468	-0.468	101.48	3.934796	
26	0.468	0.468	105.81	3.934796	

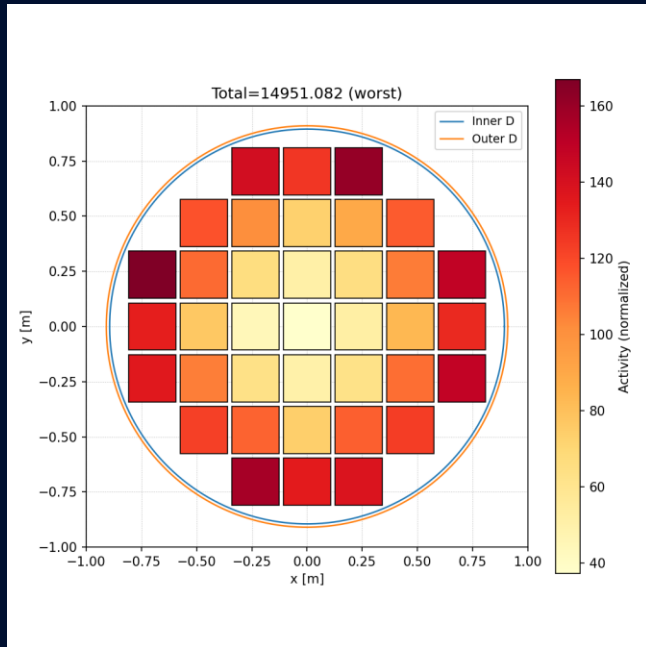
result_min.csv

출력 결과물 (좌: 캐니스터 위치별 상대 방사능량, 우: 도표)



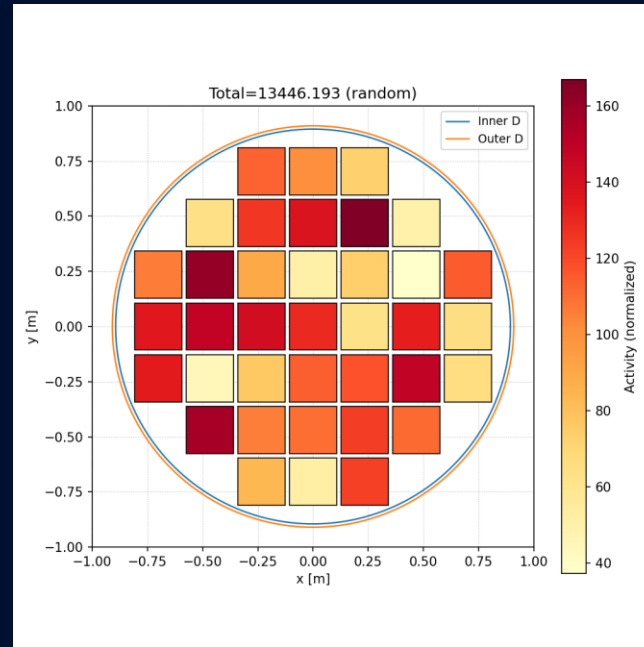
result_min.csv

3.4. 결과 예시



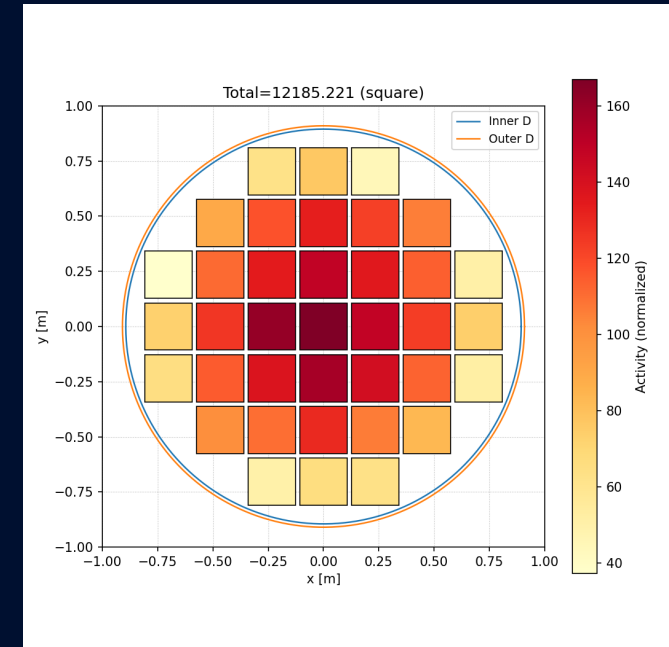
외곽 배치

상대 방사능량
14,951.082



랜덤 배치

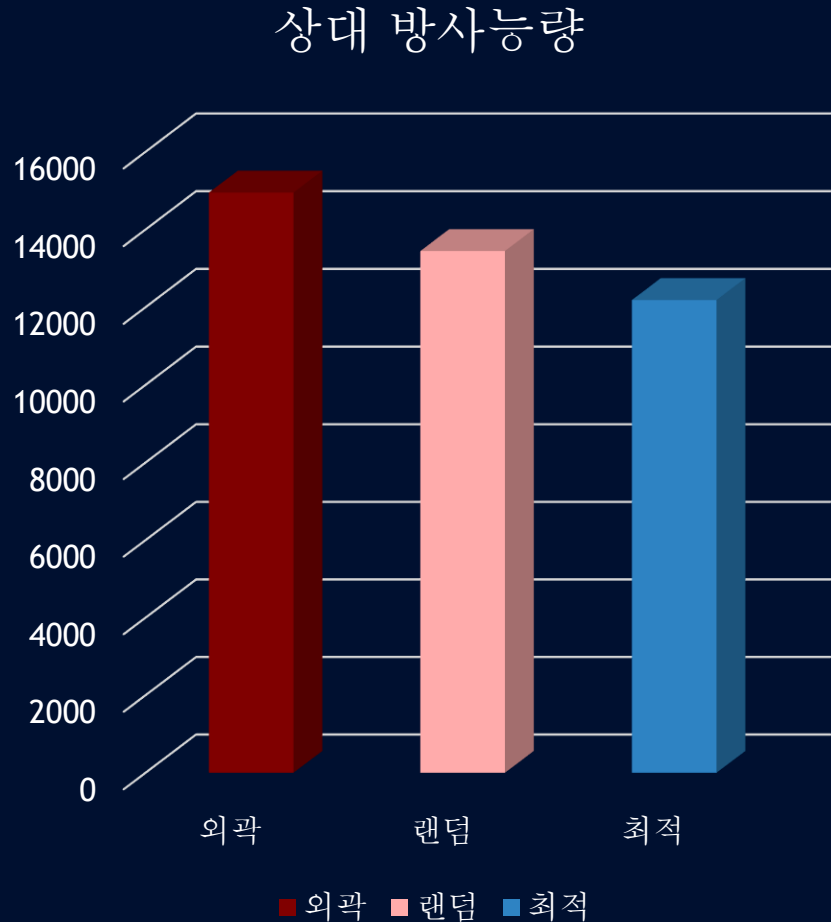
상대 방사능량
13,446.193



최적 배치

상대 방사능량
12,185.221

3.5. 결과 분석



- ▶ 외곽배치 대비 약 18-20% 외벽 방사능량 저감
- ▶ 랜덤배치 대비 약 10% 추가 감소
- ▶ 고방사능 집합체를 중심부에 배치함으로써 외벽 방사능량 기여도가 현저히 감소
- ▶ 알고리즘의 효율성: 계산시간 수 초 이내
- ▶ 방사능 불균형이 클수록 최적배치 효과 증가
- ▶ VFM 기반 기여도 모델이 실제 외벽 방사능량 분포를 정량적으로 반영
- ▶ Greedy 방식만으로도 실용 수준의 저감효과 확보

4. 결론 및 향후 계획

4.1. 결론

- ▶ VFM 기반 최적배치 프로그램 개발
 - ▶ View Factor Matrix를 이용해 캐니스터 내 핵연료 위치별 기여도(S)를 계산
 - ▶ 방사능(A)와 기여도(S)의 곱을 최소화하는 배치를 탐색 (Φ 최소화)
- ▶ 최적배치 알고리즘 구현 및 효과 검증
 - ▶ Greedy 및 Hungarian 알고리즘으로 자동 배정 수행
 - ▶ 외곽배치 대비 약 18-20% 방사능량 저감, 랜덤배치 대비 약 10% 추가 저감
 - ▶ 계산시간 수 초 이내, 실시간 배치 설계 가능
- ▶ Python 기반 모듈화 구조
 - ▶ 격자, 감쇠, 기여도, 배정, 시각화 등의 기능을 독립화

4.2. 향후 과제

- ▶ MCNP 등 타 프로그램 활용한 최적배치 프로그램 계산 결과 검증 (방사능과 방사선의 상호비교)
- ▶ 실제 집합체 별 방사능 데이터 및 시뮬레이션 결과를 반영하여 상대 방사능량의 절대 단위로의 환산인자 결정
- ▶ 열적 / 기계적 요소를 고려한 종합적 최적배치 계산 추가
 - ▶ 임의로 가중치 또는 최소치 설정 가능
- ▶ 타 종류의 캐니스터 또는 핵연료집합체 기준 계산 모듈 추가

Acknowledgement

- ▶ 이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00401705, 원전 수출 특성화 융복합 실무형 인력양성사업)
- ▶ This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the korea government(MOTIE)(RS-2024-00401705, Convergent and practical human resource development program specialized in nuclear power plant export)

Q & A