

일본의 고속로 금속핵연료 전해처리시설 개념연구

Conceptual Design Study on Electrorefining
Processing Facility for SFR Metal Fuels in Japan

KAERI

제출문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2010년도 “핵연료주기 시스템분석 연구” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2010. 08

주 저 자 : 이 호 희

공 저 자 : 고 원 일

권 은 하

박 병 흥

서 중 석

김 민 영

KAERI

요약문

사용후핵연료의 안전관리는 원자력발전소의 안정적인 운전 보장과 미래 에너지자원의 효율적인 관리측면에서 매우 중요하다. 2009년말 기준으로 우리나라에서는 연간 약 700 톤의 사용후핵연료가 발생하고 있으며, 총 20기의 원자로에서 10,761 톤의 사용후핵연료가 발생되어 발전소 부지 내에 저장되어 있다. 현재의 추세가 유지된다면 2030년경에는 사용후핵연료의 누적량이 약 30,000 톤에 이를 것으로 전망된다.

지속가능한 원자력에너지의 이용을 위해서는 사용후핵연료의 재활용이 필연적이며, 파이로기술은 사용후핵연료를 고온 용융염 상에서 금속으로 전환하여 핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 감축하여 처분 경제성을 획기적으로 높이고 이를 SFR 핵연료주기에 활용함으로써 사용후핵연료의 관리문제를 근본적으로 해결할 수 있는 핵비확산성 기술로 알려져 있다. 한국원자력연구원은 1997년부터 원자력중장기사업의 일환으로 경제성, 안전성 및 핵비확산성이 강화된 핵연료주기기술인 파이로 기술을 개발해 오고 있다. 제255차 원자력위원회(2008년 12월)에서는 「미래 원자력시스템 장기개발 추진계획」을 심의·의결함으로써 「친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 개발」을 실현하기 위한 원자력 R&D 추진동력을 확보하였다.

일본은 2005년에 “고속로사이클 실용화전략 조사연구” Phase II를 완료하고, 2006년부터 후속 프로젝트인 FaCT(Fast Reactor Cycle Technology)에 본격적으로 착수하였다. Phase II 연구의 결론으로서 NEXT(New Extraction systems for TRU recovery) 공정을 기반으로 한 선진 습식재처리 기술을 주개념, 그리고 파이로기술을 기반으로 한 금속핵연료주기기술을 보조 개념으로 선정하였다. 이를 바탕으로 사용후핵연료의 파이로 처리기술을 포함하는 고속로주기기술을 국가적 중요기술로 선정하는 한편, Phase III(~2010년)에서는 개념설계와 핵심기술의 실험적 검증을 수행하고 있다. 본 보고서는 Phase II에서 수행한 내용 중 금속핵연료 파이로 처리기술을 이용한 시설의 중요내용을 발췌하여 향후 국내에서 유사한 시설의 예비개념설계를 수행하는데 참고 자료로 활용하고자 한다.

Summary

The secure management of spent fuels is of great importance as standpoints of ensuring stable operation on nuclear power plants and managing future energy resources efficiently. As of the end of 2009, some 700 t of spent fuels was produced as an annual basis in Korea. The total amount of spent fuels from 20 units of nuclear power plants reached around 10,761 t and stored in the corresponding sites. It is expected that the amount will rise to about 30,000 t by 2030 when the current trend will be maintained.

The sustainable utilization of nuclear energy requires reuse of the spent fuels. Pyroprocessing is known as a technology appropriate to resolve the spent fuel management issue while possessing non-proliferation aspect by converting the spent fuels into a metal form in a high temperature molten salt phase and, as a consequence, reducing the volume, heat load, and radioactivity to increase economics on disposal and/or to be applicable into a SFR nuclear fuel cycle. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) has developed the pyroprocessing with increased economics, security, and non-proliferation from 1997 as a long-term nuclear project. The nuclear energy committee announced 「Plans for Long-term Future Nuclear Energy System」 at the 255th meeting in December of 2008 and advanced R&D activities to realize 「Development of Eco-friendly Fast Reactor Recycling Nuclear Fuel Cycle」.

Japan completed Phase II on "Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems" in 2005 and started FaCT(Fast Reactor Cycle Technology) from 2006 as a following project. The study of Phase II suggested an advanced aqueous reprocessing based on NEXT(New Extraction systems for TRU recovery) process as a primary option and a metal fuel cycle technology based on a pyroprocessing as a secondary option. According to the study, fast reactor fuel cycles including the pyroprocessing for spent fuels were accepted as important national technologies. Conceptual design and experimental demonstrations of core technologies are scheduled in Phase III until 2010. The essential contents of the result from Phase II was selectively introduced in this report to be used as a reference for a preliminary conceptual design of a similar facility to be built in the future.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 일본의 실용화 전략 조사 연구 PhaseⅡ의 개요	2
제 1 절 PhaseⅡ의 개발 목표	2
제 2 절 핵연료주기 시스템의 PhaseⅡ 설계 요건	5
1. 고속로 핵연료주기 시스템의 FP, MA 혼입률	5
2. 안전성	6
3. 경제성	7
4. 환경부하 저감성	7
5. 유효자원 이용성	8
6. 핵확산저항성	8
7. 운전·유지보수성	9
8. 기술적 성립성	9
제 3 장 금속핵연료 전해처리시설의 예비설계	12
제 1 절 금속핵연료 전해처리의 개요	12
제 2 절 시설개념 구축	13
1. 프로세스	13
2. 물질수지	19
3. 처리제품과 제염계수	26
4. 폐기물	26
5. 장치설계	34
6. 시설설계	52
제 3 절 기술평가	68
1. 안전성	68
제 4 장 경제성	104
제 1 절 건설비	104
1. 건설비 범위	104
2. 설비비	104
3. 건물비	105

4. 평가 대상 제외	105
제 2 절 연간 운전 경비	107
1. 인건비	108
2. 기기 교환비	109
3. 정기 검사비	109
4. 소모품 등	111
5. 위탁비	111
제 3 절 전해처리 단가·연료 사이클 비용	114
1. 자본비	114
2. 조업비	115
3. 연료 사이클비 (건식처리비)의 적산	114
참고문헌	116

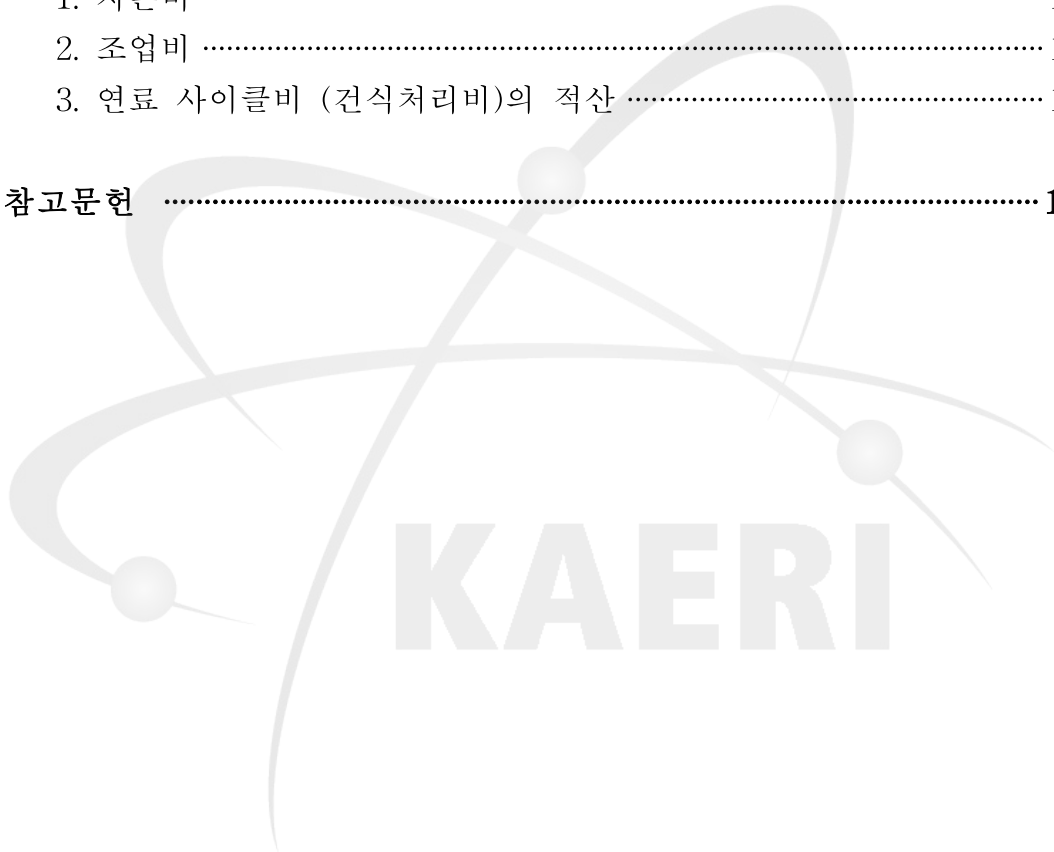


표 목차

표 2.1. 실용화 전략 조사 연구 PhaseⅡ의 개발 목표	4
표 2.2 연료 사이클 시스템의 설계 요건과 설정 근거	9
표 3.1. 금속전해법에서 FP 원소의 제품·환경방출·폐기물로의 이행률	25
표 3.2. 금속연료의 금속전해법에 의한 건식처리제품과 U, TRU 회수율	27
표 3.3. 금속연료 건식처리시설(38 tHM/yr)과 록카쇼 재처리시설에서 대기 또는 해양에 방출되는 주요 핵종 방사능량 비교	30
표 3.4. 금속연료 리사이클 플랜트의 주요 폐기물량	31
표 3.5. 주요기기의 사양(금속연료 금속전해 처리시설, 38 tHM/yr)	37
표 3.6. 38tHM/년 용량 금속연료 리사이클 시설의 셀용량	55
표 3.7. 주요 공급시약, 유틸리티의 소요량	58
표 3.8. 38 tHM/년 용량 금속연료 리사이클 시설의 각 건물 용적	62
표 3.9. Ar 셀의 밀봉 설계에서 동적 밀봉/ 정적 밀봉 적용 결과	74
표 3.10. 금속전해에서의 핵적 제한치	78
표 3.11. 화학 형태 관리를 적용한 전해정련조의 핵적 제한치	80
표 3.12. 연속식 음극 처리장치의 임계안전해석	83
표 3.13. 평상시 피폭 평가에서 가정한 주요 핵종의 대기방출 방사능 ...	89
표 3.14. 금속전해법 건식처리 시스템으로 가정되는 이상사건과 설계대응	92
표 3.15. 「전해정련조에서 셀 내로 내포물의 전량누설」 사건의 개요 피 폭평가	99
표 3.16. 「Ar 셀 바운더리 파손에 의한 대기 침입 및 금속화재」 사건의 개요 피폭평가	110
표 4.1. 설비비의 적산대상	106
표 4.2. 운전관련인원	110
표 4.3. 각 설비마다 가정한 교환빈도	112
표 4.4. 주요소모품	113

그림 목차

그림 3.1. 금속핵연료 전해처리시설의 공정흐름도	13
그림 3.2. 금속핵연료의 금속전해 공정흐름도	14
그림 3.3. 금속전해 시(500 ℃) 주요원소의 전위	15
그림 3.4. 금속연료 리사이클 시설의 물질 수지도	20
그림 3.5. 환경방출 기체폐기물처리 흐름도	28
그림 3.6. 환경방출 액체폐기물처리 흐름도	28
그림 3.7. 고준위 방사성폐기물 처리 흐름과 폐기물 발생량	33
그림 3.8. 고βγ폐기물 및 TRU 폐기물의 처리 흐름과 폐기물 발생량 ..	33
그림 3.9. 전해정련조 외형도	41
그림 3.10. 전해정련조 내 양극 바스켓과 음극의 배치와 전기회로	43
그림 3.11. 고체음극처리장치 외형도	44
그림 3.12. Cd음극 처리장치 외형도	45
그림 3.13. 환원추출기의 외형도	47
그림 3.14. 금속연료 리사이클 시설의 물질수지구역(MBA)	53
그림 3.15. 처리시설 셀 내의 주요기기 배치도	56
그림 3.16. 주요 기기간 작업대, 임시보관 창고 등의 용량설정	57
그림 3.17. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 전체 배치도 (38 tHM/yr)	63
그림 3.18. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 전체 조감도 (38 tHM/yr)	63
그림 3.19. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지하 1층 평면배치도 (38 tHM/yr)	64
그림 3.20. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지상 1층 평면배치도 (38 tHM/yr)	64
그림 3.21. 금속전해 금속연료 건식처리시설의 지상 2층 평면배치도 (38 tHM/yr)	65
그림 3.22. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지상 3층 평면배치도 (38 tHM/yr)	65
그림 3.23. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지상 4층 평면배치도 (38 tHM/yr)	66

그림 3.24. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 옥상 평면배치도 (38 tHM/yr)	66
그림 3.25. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 A-A면 단면배치도 (38 tHM/yr)	67
그림 3.26. 금속전해법 금속연료 리사이클 시설의 B-B면 단면배치도 (38 tHM/yr)	67
그림 3.27. 금속전해 시스템의 기기·탑반응기 오프가스 시스템	72
그림 3.28. 금속전해 시스템의 셀 환배기 시스템	73
그림 3.29. Ar 셀 압력 변동 해석 모델	75
그림 3.30. Ar 셀 압력 변동 해석 결과(냉각기능 손실 사건)	76
그림 3.31. 전해정련조에서 화학형태 관리 병용 질량 관리의 개념도	79
그림 3.32. 증류 도가니	82
그림 3.33. 연속식 Cd 음극처리장치 평면도	82
그림 3.34. 연속식 음극처리장치 (액체 Cd 음극)의 임계 안전 해석 모델	83
그림 3.35. 연속식 Cd 음극처리장치의 누설액 받침 접시 개념	85
그림 3.36. 정상 시 실효선량에 기여하는 핵종 내역	90
그림 3.37. 금속전해법 시스템에서 일반 공중의 연간 치사암 발생확률의 추정결과 중 이상사건의 내역	102
그림 3.38. 금속전해법 시스템에서 일반 공중의 연간 치사암 발생확률 내 역	102
그림 4.1 건설비 내역	106
그림 4.2 연간 운전 경비 내역	107

제 1 장 서 론

지속가능한 원자력에너지의 이용을 위해서는 사용후핵연료의 재활용이 필연적이며, 파이로기술은 사용후핵연료를 고온 용융염 상에서 금속으로 전환하여 핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 감축하여 처분 경제성을 획기적으로 높이고 이를 SFR 핵연료주기에 활용함으로써 사용후핵연료의 관리문제를 근본적으로 해결할 수 있는 핵비확산성 기술로 알려져 있다. 한국원자력연구원은 1997년부터 원자력중장기사업의 일환으로 파이로시스템의 요소 기술이라 할 수 있는 사용후핵연료 관리·이용 기술의 개발이 착수하였고, 2001년 7월에 발표된 제2차 원자력진흥 종합계획에 따라 경제성, 안전성 및 핵비확산성이 강화된 핵연료주기기술인 파이로 기술을 개발해 오고 있다. 제255차 원자력위원회(2008년 12월 22일)에서는 「미래 원자력시스템 장기개발 추진계획」을 심의·의결함으로써 「친환경 고속로 순환핵연료주기 시스템 개발」을 실현하기 위한 원자력 R&D 추진동력을 확보하였다. 이 계획에 따르면, 2011년까지 공학규모 파이로 일관공정 Cold 시험시설(PRIDE)을 구축하고, 2016년까지 공학규모 실증시설, 2025년까지 종합파이로시설인 KAPF(100 tHM/yr) 시설 구축을 목표로 하고 있다.

일본은 2005년에 “고속로사이클 실용화전략 조사연구” Phase II를 완료하고, 2006년부터 후속 프로젝트인 FaCT(Fast Reactor Cycle Technology)에 본격적으로 착수하였다. Phase II 연구의 결론으로 NEXT(New Extraction systems for TRU recovery) 공정을 기반으로 한 선진 습식재처리 기술을 주개념, 그리고 파이로기술을 기반으로 한 금속핵연료 주기기술을 보조 개념으로 선정하였다. 이를 바탕으로 사용후핵연료의 파이로 처리기술을 포함하는 고속로주기기술을 국가적 중요기술로 선정하는 한편, Phase III(~2010년)에서는 개념설계와 핵심기술의 실험적 검증을 수행하고 있다. 본 보고서는 Phase II에서 수행한 내용 중 금속핵연료 파이로 처리기술을 이용한 시설의 중요내용을 발췌하여 향후 국내에서 유사한 시설의 예비개념설계를 수행하는데 참고 자료로 활용하고자 한다.

제 2 장 일본의 실용화 전략 조사 연구 Phase II 의 개요

제 1 절 Phase II 의 개발 목표

일본의 “실용화 전략 조사 연구” Phase II에서는 고속로 핵연료주기 시스템을 장래의 주요한 에너지 공급원으로 확립하기 위해 표 2.1에 나타낸 바와 같이 안전성, 경제성, 환경부하 저감성, 핵확산저항성을 개발목표로 설정하였다.

○ 안전성 :

심층 방호를 기본으로 하여, 이상사건의 발생과 확대 방지를 최우선으로 한 안전설계를 수행하여 경수로 사이클 시스템과 동등 이상의 안전성을 확보한다. 그리고 각 시스템의 특성에 맞춰 보다 확실하고도 명확한 안전성 확보 대책의 실현을 목표로 한다. 이것을 통해 고속로 핵연료주기 시스템의 도입에 따른 리스크가 이미 사회에 존재하는 리스크보다도 현저하게 적은 리스크를 목표로 한다.

○ 경제성

고속로 핵연료주기 시스템의 실용화에 있어서는 시장 경쟁 원리를 바탕으로 도입이 가능하도록 경제성을 달성할 필요가 있다. 이를 위해 에너지 원가(발전원가)는 경합대상이 되는 경수로 또는 타 에너지원에 비해 경쟁력을 갖는 것을 목표로 하고 있다. 더욱이 고속로 핵연료주기 시스템의 국제적 상황도 고려하여 경제성을 한층 더 높이기 위한 검토도 수행한다.

○ 환경부하 저감성

고속로 핵연료주기 시스템의 특징을 활용하여 경수로 및 고속로 핵연료주기 시스템에서 생기는 장수명 초 우라늄 원소(TRU)나 장수명 핵분열생성물(LLFP)의 연소나 분리·핵변환 등으로 방사성폐기물의 발생량, 방사능 및 잠재적 유해도의 저감을 목표로 한다. 또한 고속로 핵연료주기 시설의 운전·유지보수 및 폐지 조치에 수반되는 폐기물의 발생량 저감 및 환경으로의 이행량 저감을 목표로 하며, 고준위폐기물의 고감용 처리나 처분기술에 적합한 고화체의 검토도 수행한다.

○ 유효자원 이용성

지속적인 원자력에너지의 생성과 전력 수요의 증대 등 앞으로의 다양한 수요에 대응을 목표로 한다.

○ 핵확산저항성

고속로 핵연료주기 시스템의 실용화에 있어서 국제적으로 원자력의 평화적 이용을 목적으로 하고 있음을 명확하게 목표로 한다. 이를 위해 핵확산저항성을 높임으로써 핵물질 방호 및 안전조치 대응의 부하경감을 도모하는 한편 핵비확산 제도 운용의 효율화에 이바지한다.

표 2.1. 실용화 전략 조사 연구 PhaseⅡ의 개발 목표

안전성	<ul style="list-style-type: none"> • 취급 물질의 물리·화학적 특성(화학적 활성도, 방사능에 대한 잠재적 유해도 등)과 프로세스 조건(운전 온도 등)을 통한 안전 대책 • FBR 사이클 시스템의 도입 리스크가 사회에 이미 존재하고 있는 리스크와 비교해서 충분히 적다. <ul style="list-style-type: none"> - FBR 시스템 : 노심 손상에 이르는 위험이 있는 사건의 발생을 방지하는 동시에 가령 그러한 사건이 발생한다고 가정하여도 노심용기 또는 격납 시설 내에서 종식. - 연료 사이클 시스템 : 임계안전, 밀봉 기능 확보
경제성	<ul style="list-style-type: none"> • 미래의 에너지원에 필적하는 발전단가 달성 • 글로벌적인 비용 경쟁력 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 한층 더 높은 물량 저감 - 해외 조달 등
환경 부하 저감성	<ul style="list-style-type: none"> • 장수명 핵종(TRU 및 LLFP)의 연소 또는 분리변환을 통한 지층처분의 부하 경감 • 운전·유지보수 및 폐지조치 등에 수반되는 폐기물의 발생량 저감
유효자원 이용성	<ul style="list-style-type: none"> • 지속적인 핵연료의 생산 <ul style="list-style-type: none"> - TRU 연료의 리사이클 - LWR 사용후핵연료에서 회수한 TRU를 FBR 리사이클 • 에너지원으로서의 다양한 수요에 대응 <ul style="list-style-type: none"> - 수소 제조, 해수담수화, 열 공급, 분산전원 등
핵확산 저항성	<ul style="list-style-type: none"> • 핵물질 방호 및 안전조치 대응의 부하 경감(Pu가 순수한 상태로 존재하지 않음 등) • 핵비확산 제도의 운용 효율화 (격리유지·감시, 자동화 기술 등)

제 2 절 핵연료주기 시스템의 Phase II 설계 요건

고속로 핵연료주기 사이클 Phase II의 5개 개발 목표를 실현하기 위해 표 2.2에 나타낸 바와 같은 정량적인 설계요건을 설정하였다. 5개 항목의 개발 목표 이외에도 운전·유지보수성과 기술적 성립성 항목을 새롭게 추가하였다. 운전·유지보수성은 가동률 확보와 관련된 것으로 경제성 평가에 포함한다고 볼 수 있지만, 핵연료주기 시스템의 설계 시 고려하여야 할 중요한 사항이기 때문에 별도 항목으로 채택하였다. 또한, 기술적 성립성은 설계적합성 평가 시 전제가 되는 것이며, 기술적 난이도가 높고 기술적 성립성에 과제가 남아있는 혁신 기술 등은 향후 개발이나 적용의 유무를 판단할 때 중요한 인자가 되므로 별도 항목으로 채택하였다.

또한 신연료에 FP나 MA의 혼입률은 노 성능에 영향을 미칠 뿐 아니라 처리 시 요구되는 FP 제염성능이나 신연료의 제조성 등에도 영향을 주는 중요한 인자이다. 예를 들면, FP 제염 성능의 향상은 신연료 속의 FP 혼입량을 저감시켜 노심 성능의 향상과 직결되지만 정제 공정의 추가가 필요하고 폐기물발생량도 증대하므로 경제성이나 환경 부하 저감성을 악화시킨다. 이러한 이유로 고속로 핵연료주기 시스템의 설계 시 기준치인 신연료의 FP나 MA의 혼입률을 표 2.2에 별도로 설정하였다.

1. 고속로 핵연료주기 시스템의 FP, MA 혼입률

가. FP 혼입률

고속 중성자를 이용하는 FBR은 노심의 불순물 함유 허용량이 크고 MA를 함유 한 TRU 연료도 효율적으로 연소시킬 수 있지만, 노심 성능은 신연료의 FP 혼입률이나 MA 함유율에 의존한다. Phase I 에서부터 Phase II 중간 평가까지는 건식처리법(산화물전해법)의 FP 제염계수를 이용하여 신연료 중금속량(HM)의 2 vol%(MOX 연료는 1.2 wt% 상당) 정도의 FP가 일률적으로 혼입해 있는 것으로 보고 설계 평가를 진행하였다. 그러나 FBR 사이클 시스템의 경제성을 가능한 한 향상시키기 위해서는 신연료의 FP 혼입률을 내려 노심 연소도의 향상을 도모하는 것이 바람직하다. 각

연료 사이클 시스템의 설계 검토가 진척되어 있는 현재, 처리 시스템의 특성을 근거로 하여 합리적으로 달성 가능한 FP 혼입률을 설정하여 금속 전해법의 FP 혼입률은 HM량의 0.3 wt%로 설정하였다.

나. MA 함유율

FBR에서의 연소와 처리·연료 제조를 여러 번 반복한 FBR 평행 사이클 시, 신연료 및 사용후핵연료 중에 함유되는 MA량은 각 연료 형태에 따라 아래와 같이 거의 일정하며, 이를 근거로 금속핵연료 리사이클의 경우 MA 함유율은 HM량의 0.2 ~ 0.4 wt%로 설정하였다. 또한, LWR 연료 처리로 회수한 MA를 FBR에서 적극적으로 인수하여 연소시키는 경우에는 신연료 중에는 HM량의 최대 5 %정도까지의 MA함유가 가정되기 때문에 특히 연료 제조에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 안전성

핵연료주기 시스템의 안전성은 「FBR 사이클 시스템이 초래하는 리스크가 사회에 이미 존재하는 리스크와 비교하여 현저히 적도록 한다.」라는 개발 목표를 달성하기 위해 이상사건의 발생 요인을 적극적으로 제거하고 차폐 기능 및 밀봉 기능에 충분한 신뢰성을 갖도록 설계한다. 더욱이 다중 방호를 위해 이상사건의 확대 방지 기능, 영향 완화 기능을 적절히 적용하여 「대량의 방사성 물질이 제어되지 않고 경계 밖으로 이행 하는 사건(방사성 물질의 대규모 방출 사건)」을 가정하여도, 일반 공중에 과도한 방사선 피폭 리스크가 미치지 않도록 방사성 물질을 시설 내에 밀봉하는 것이 가능하도록 설계한다.

보다 구체적으로는 LWR 사이클 시스템과 동등 이상의 안전성을 갖추는 것을 설계 요건으로 한다. 더욱이 사고시의 리스크를 사회에 이미 존재하는 리스크에 비해 현저히 저감시키고 「방사성 물질의 대규모 방출 사건」이 주변 공중에 급성 사망 리스크를 줄 가능성이 있는 경우의 발생 빈도로는 10^{-6} /플랜트·년 미만을 설계 목표로 적용한다.

3. 경제성

사용후핵연료 처리·연료 제조 일체화 시설을 전제로 하여 미래의 LWR 사이클 시스템과 동등 이상의 경쟁력을 확보할 수 있도록 FBR 사이클 시스템이 목표로 정한 발전 원가(4 엔/kWh)중 「처리 및 연료 제조비 합계가 0.8 엔/kWh 이하」를 설계 목표로 한다. 수송비, 폐기물 처분비 등을 포함한 「연료 사이클비는 1.1 엔/kWh 이하」를 설계 목표로 한다. 플랜트 가동률은 현행의 LWR 재처리 플랜트나 MOX 연료 제조 플랜트의 설계 요건을 참고하여 연간 200일로 한다. 이러한 고가동률을 실현하기 위해서는 플랜트의 신뢰성(운전·유지보수성) 확보가 필요하다. 플랜트 수명은 건물(셀라이너 포함)은 40년으로 하고, 내부 기기는 개별적으로 교환 빈도를 평가한다.

또한 시설의 처리 규모는 경제성에 크게 영향을 주는 중요한 인자이다. PhaseⅡ 검토는 처리 규모를 다음과 같이 설정하였다. 미래 원자력 발전 설비 용량 58 GWe를 모두 FBR로 조달한다고 가정할 때 MOX 연료의 경우는 약 420~530 tHM/yr (증식비 1.03~1.10), 금속핵연료의 경우는 약 310~360 tHM/yr(증식비 1.03~1.11)의 규모가 요구된다. 건식 처리법은 모듈 단위의 배치처리 프로세스이기 때문에 스케일 효과는 습식 재처리법에 비해서는 작지만, 소규모로도 비교적 높은 경제성을 확보할 가능성이 있다. 이러한 사항을 근거로 하여 본 연구에서는 연료 사이클 비의 스케일 효과로 처리 규모의 영향을 평가하기 위해 대규모 플랜트 및 소규모 플랜트로서 각각 200 tHM/yr 및 50 tHM/yr의 처리 규모의 플랜트에 대한 설계 연구를 실시하였다. 이때 처리 규모의 HM량은 신연료 제조량을 기준으로 한다.

4. 환경부하 저감성

최종처분 폐기물량의 저감 및 처분장 합리화를 추진하여 정상 운전시의 방사성물질 방출량 및 단위 발전량당의 방사성폐기물의 발생량을 현행

LWR 사이클 시스템과 동등 이하로 하는 것을 설계 요건으로 하여 1/10로 저감을 목표로 한다.

또한 고준위 방사성폐기물의 방사능에 대한 잠재적 유해도 저감을 위해 U 및 TRU의 방사성폐기물로의 이행률 저감 가능성에 대해서도 검토하여 유효자원 이용의 관점에서 설정한 값(U 및 TRU 각각 회수 비율 99% 이상) 보다 더 낮은 「0.1 % 이하의 이행률」을 목표로 한다.

폐지조치의 용이(해체성) 및 폐지조치에 수반되는 폐기물 발생량에 대해서도 가능한 한 저감을 목표로 한다. 장수명이나 발열성 FP 핵종을 분리하고, 핵변환이나 감쇠 저장 등으로 처분장 부하 저감을 추구한다. I, Tc는 분리 회수·리사이클하고, Cs, Sr은 분리 회수하여 방사성폐기물로의 이행률은 I, Tc는 1~0.1 %, Cs, Sr는 1 % 이하를 목표로 한다.

5. 유효자원 이용성

유효자원 이용의 관점에서 U 및 TRU의 방사성폐기물로의 이행률은 가능한 한 저감을 목표로 한다. 지금까지의 U 및 Pu 회수 실적을 참고로 U 및 TRU의 각각 회수율은 99 % 이상을 설계 목표로 한다.

6. 핵확산저항성

핵물질 방호 및 보장조치에 대한 부담경감과 핵비확산 제도의 운용 효율화를 목표로 한다. 각 프로세스의 특성을 살려 원격 감시, 자동화 기술 등으로 제도 운용의 효율화와 더불어 각 프로세스에서 순수한 Pu이 단독으로 존재하지 않도록 하고, 저제염 TRU 연료를 적용하여 접근성을 제한하는 방법 등으로 핵비확산 제도에 대한 부담 경감을 도모한다.

또한 현행 LWR 재처리 시설 및 MOX 연료 제조 시설에서의 계량 관리 방법, 핵물질 방호 방법 등의 적용이 곤란하거나 합리적이지 아닌 경우, 시스템의 특징에 적합한 방법과 방안을 제안한다.

7. 운전·유지보수성

운전·유지보수에 대한 방안을 명확하게 하고, 유지보수를 필요로 하는 기기는 유지보수 방법을 구분하여 필요한 접근로 및 유지보수 공간을 확보할 뿐 아니라 작업자의 피폭저감을 고려하여 설계한다.

또한 운전 간소화, 자동화, 운전 제어 고도화 및 유지보수가 용이하도록 설계하여 운전·유지보수 작업에서의 휴먼에러 방지, 유지보수 작업량 저감, 운전원·유지보수인력의 노동력 절감, 유지보수 작업자의 피폭 저감을 도모한다.

8. 기술적 성립성

뒷받침될 만한 자료를 설계 근거로 시스템을 구축한다. 근거 실험데이터가 미비한 경우에는 이를 개발하기 위한 목표도 설정한다. 프로세스 조건 설정의 배경이 명확한 시스템 개념설계를 실시한다.

표 2.2. 연료 사이클 시스템의 설계 요건과 설정 근거

항 목	요구값*	목표값**	설정 근거
금속전해 FP제염성능	HM의 0.3 wt%		[목표치]처리시스템의 특성을 근거로 합리적으로 달성 가능한 값(사이클제품으로의 FP혼입량으로 정의) [요구치] 사이클 제품으로의 FP혼입량이 1.2 wt% 이하
금속핵연료 MA함유량	HM의 0.3~0.4 wt%	최대 5wt% MA 첨가	[목표치]FBR 다중 사이클에서의 MA함유량 [목표치]경수로 연료 재처리로 회수한 MA를 적극적으로 연소하는 경우를 가정
안전성	LWR 재처리· MOX 제조 시설과 동등이상		[요구치]동종의 플랜트와 동등의 안전성을 최저한의 조건으로 설정

		<ul style="list-style-type: none"> 결정론적 안전 요구 : 시설 내에서 대규모 방출 사건시에도 방사성 물질의 시설 내 밀봉능력을 확보하여, 영향을 주변 환경에 미치지 않도록 설계 확률론적 안전 요구 : 시설 내에서의 대규모 방출사건의 발생빈도 10^{-6}/플랜트년 미만 		FBR 시스템과 동등한 안전 레벨 설정
	경제성 (처리+연료제조비)	0.8 엔/kWh이하 (운송비, 폐기물 처분비 등을 포함한 연료사이클비 1.1엔/kWh이하)	-	[요구치]미래 경수로 사이클에 필적할 만한 경제성
환경부하 저감성	환경 방출 방사능	단위발생량 당 발생량이 LWR 재처리 시설 및 MOX 연료 제조 시설의 인허가 신청치 이하	-	[요구치]동종 플랜트와 동등한 방출량을 최저한의 조건으로 설정
	운영 방사성 폐기물	단위발생량 당 발생량이 LWR재처리 시설 및 MOX연료 제조 시설과 동등이하	요구치의 1/10	[요구치]동종 플랜트와 동등한 방출량을 최저한의 조건으로 설정
	폐지조치	폐지조치의 간편성과 수반되는 폐기물 발생량이 적도록 설계		
	U·TRU 의 폐기물로 이행률	-	0.1 %	[목표치]유효자원 이용의 관점에서 설정치(1 %)와는 별개로 처분체의 잠재적 영향저감 효과를 확보하기 위해 설정
	장수명FP, 발열성FP 폐기물로 의 이행률	프로세스 고유 방법으로 회수 가능한 범위로 회수	장수명, Tc : 1~0.1 % 발열성 Cs, Sr : 1 %	[요구치]대규모 프로세스 변경이 불필요한 범위에서 회수가능한 양. [목표치]발열원소는 고준위 폐기물 처분체의 열적 제한을 없애는 것을 목표로 설정

유효자원 이용성	U, TRU 회수율	각각 99 % 이상	-	[요구치] 미래 FBR 사이클 의 목표를 고려하여, TRU 도 동일하게 회수한다고 설 정
핵확산저항성		원격감시, 자동화기술 등으로 핵물질 방호, 보장조치의 제도 운영 효율화, 각 프로세스에서 Pu가 단독으로 존재하지 않는 설계, 저제염 TRU연료에 수반 되는 고선량화로 신연료 및 사 용후핵연료에 접근성 제한		현 단계에서는 정량화가 어 려우므로 설정하지 않음.
운전 · 유지보수성		운전간소화, 자동화, 운전제어 시스템의 고도화, 검사 및 유지 간편 설계 등, 시스템의 특성을 고려하여 운전성, 유지보수성의 향상을 도모한 설계		
기술적 성립성		설계 근거의 명확화와 신뢰성 향상		

* 요구값 : 필수로 달성해야만 하는 최저한의 값

** 목표값 : 요구치보다 우수한 시스템의 실현을 목표로 하는 값

KAERI

제 3 장 금속핵연료 전해처리시설의 예비설계

제 1 절 금속핵연료 전해처리의 개요

금속핵연료의 전해처리기술은 미국 아르곤 국립연구소(ANL)에서 1980년대 초반부터 개발되어 왔다. ANL에서는 EBR-II(Experimental Breeder Reactor-II)에서 발생한 약 25 tHM의 사용후핵연료를 처분목적으로 HFEF(Hot Fuel Examination Facility), FCF(Fuel Conditioning Facility)에서 실증실험을 실시하여 전해처리, 폐기물처리 등의 금속전해 주요 기술에 대한 실적을 축적해 왔다. 일본에서는 전력중앙연구소, 원자력연구개발기구 등이 중심이 되어 금속핵연료를 사용하는 FBR의 사용후핵연료 등을 대상으로 한 금속핵연료 전해기술에 관한 연구개발을 수행하고 있다. 또한 영국, 프랑스 등에서도 기초적인 연구가 실시되고 있다.

이러한 기술을 바탕으로 일본에서는 연료사이클 시스템의 실용화를 목적으로 높은 경제성을 가진 대용량 처리시설의 시스템설계를 실시하는 것을 목표로 하고 있다. 지금까지 개발된 ANL의 실험 장치를 고려하여 전해조, 음극처리, TRU회수 공정 등의 처리용량 대형화를 반영한 금속핵연료 금속전해법의 시스템 설계를 실시하였다. 이러한 연구는 일본의 전력중앙연구소와 원자력연구개발기구가 공동으로 실시하였다.

금속핵연료의 금속전해법은 처리 용량 50 tHM/yr 및 200 tHM/yr의 건식처리시설 개념설계 연구를 실시하였다. 산화물 연료노심과 금속핵연료 노심의 평균연소도의 차를 고려하여 동일 발전량에 상당하는 사용후핵연료를 처리하는 것을 방침으로 하여, 산화물 연료의 건식처리시설의 처리용량 50 tHM/yr에 상당하는 38 tHM/yr를 금속핵연료 금속전해법의 건식처리시설 처리용량으로 하였다. 전해정련조의 대형화, 연속식 음극처리장치의 적용 등 주요기기의 고성능화를 도모하여 기기설계의 구체화를 진행했다. 그리고 주요기기의 운전·보수기술의 개선을 고려하여 셀 내 기기배치, 건물배치의 설계검토를 진행하였다. 또한 구축한 건식처리시설에 관한 안전성 및 경제성 등의 평가를 실시하였다.

제 2 절 시설개념 구축

1. 프로세스

금속핵연료 금속전해 처리시설은 연간 200일 조업을 기준으로 신장전 연료 38 tHM/yr 제조를 기준 처리용량으로 설정하였다. 이 용량은 34.3 tHM/yr(연료집합체수로는 199다발)의 고속로 사용후핵연료 처리에 상당한다. 처리하는 고속로 사용후핵연료는 노심연료 18.6 tHM/yr, 축 블랑켓 연료 7.6 tHM/yr, 경 블랑켓 연료 8.1 tHM/yr로 구성된다. U과 TRU의 회수율 99 % 이상 및 제품으로의 FP혼입을 0.3 % 이하로 설정하였다.

금속핵연료 금속전해 처리시설 공정흐름도 및 금속전해 공정흐름도는 그림 3.1 및 3.2에 나타낸 바와 같다. 상용 건식처리시설을 대상으로 한 본 연구에서는 공학규모의 실증시험을 목적으로 하는 ANL의 장치와 비교하여, 높은 처리능력을 가지는 기기가 요구된다. 이러한 요구에 따라 합리화 및 효율화의 관점에서 고체음극/액체 Cd 음극의 동시 전해방식을 적용하여 1기당 처리능력이 높은 대형 전해정련조, 연속식 고체음극처리장치 및 Cd음극 처리장치를 적용하였다.

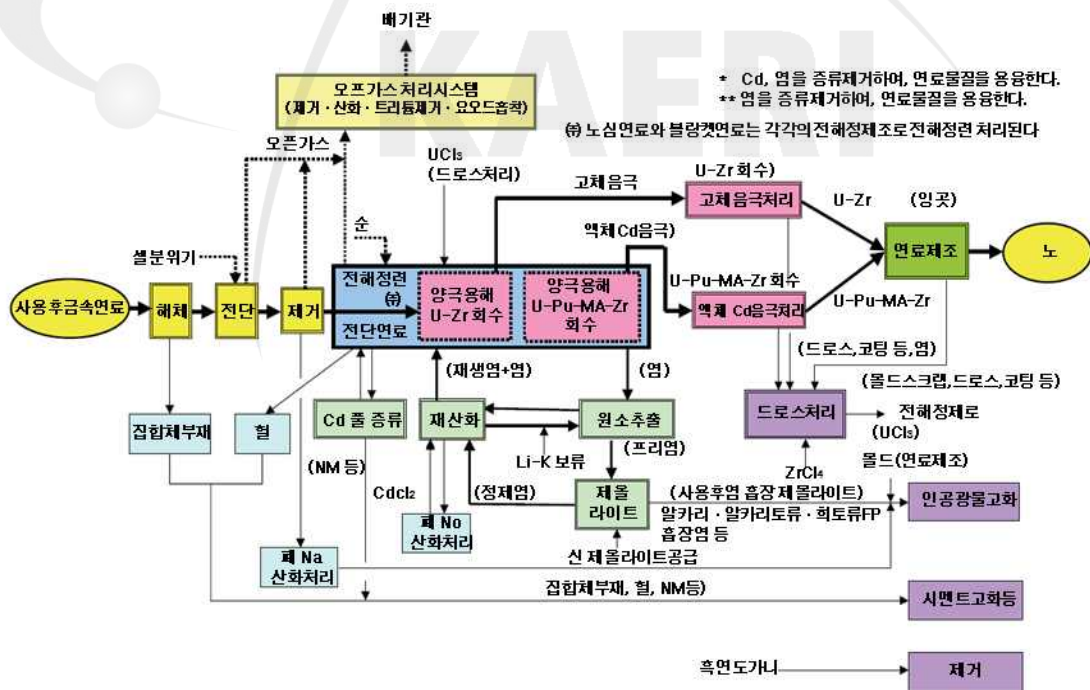


그림 3.1. 금속핵연료 전해처리시설의 공정흐름도.

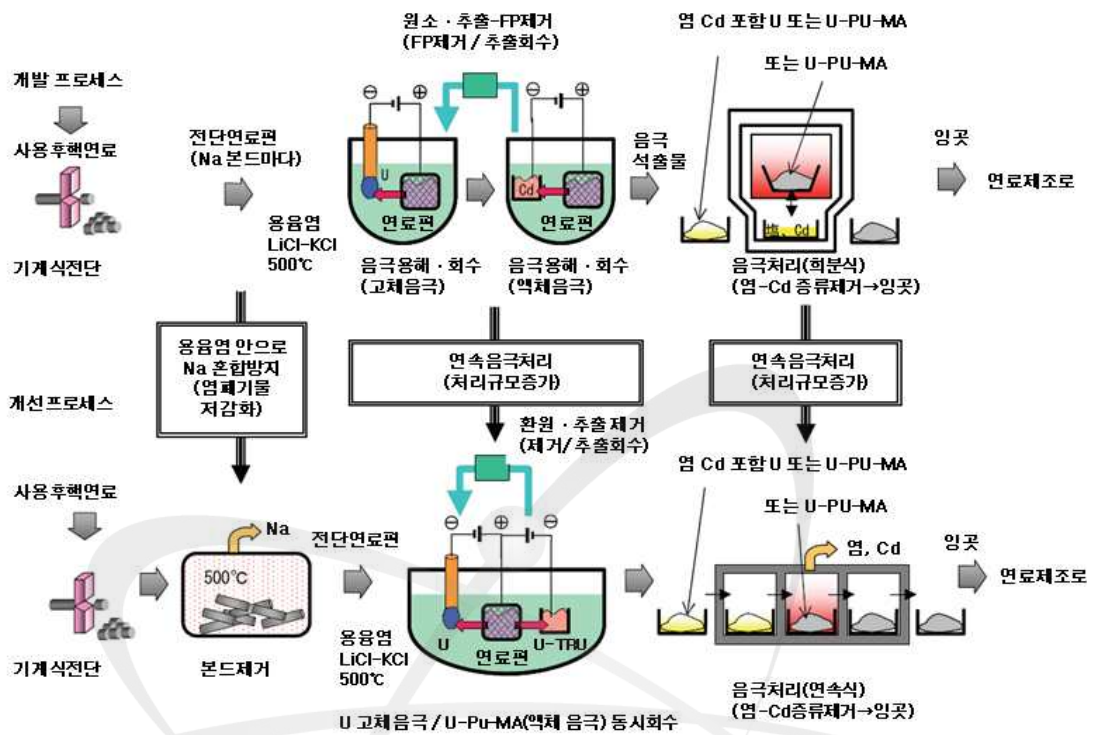


그림 3.2. 금속핵연료의 금속전해 공정흐름도.

또한 폐기물발생량 저감을 위해 Na본드 제거공정, 염 리사이클 공정을 추가하여 염화처리에 의한 드로스 재이용 등의 개선을 실시한 것 외에도 Ar 셀 내의 불순물(산소, 수분, 질소) 제거를 위해 PSA(Pressure Swing Adsorption) 방식을 적용하였다. 핵확산저항성 향상의 관점에서 전해정련 조에서 노심연료와 경 블랑켓 연료를 혼합하여 처리하도록 구성되었다. 각 공정의 개선점 등은 아래에 서술한 바와 같다.

○ 핀 전단 공정

연료집합체를 해체하여 인출한 연료핀을 기계식 전단을 이용하여, 노심연료는 약 10 mm, 블랑켓 연료는 약 30 mm로 전단한다. 각각의 절단연료봉은 양극 바스켓에 장전한다.

○ 나트륨(Na) 본드 제거 공정

금속핵연료의 본드재로 사용되는 Na이 후속공정인 전해정련조에 혼입되면 염의 용점이 상승하기 때문에 정기적으로 염의 일부를 폐기할 필요가 있다. 전해정련조로 Na 혼입 장전량을 감소시켜 염 폐기물량을 저감하기 위해 Ar분위기(저압), 약 500 °C의 온도에서 Na 본드를 분리하는 공정을 적용하였다. 이 Na 본드제거 공정에서 휘발성 FP의 일부도 제거될 것으로 기대된다.

○ 노심연료와 경 블랑켓 연료의 혼합처리

핵확산저항성 향상을 위해 노심연료와 경 블랑켓연료의 혼합처리를 원칙으로 한다. 집합체 해체에서 Na본드 제거까지의 전처리 공정에서는 노심연료와 경 블랑켓 연료는 각각 취급되지만 양 연료 모두 절단 연료봉을 동일 전해정련조에 장전하여 이후의 공정에서는 혼합연료로 처리한다. 각 전해정제조에는 동시에 4개의 양극 바스켓이 장전되고, 이 중 3개는 노심연료, 1개는 블랑켓 연료를 장전한다.

○ 양극용해와 U 및 U-TRU 석출물 회수

용융온도가 약 360 °C인 LiCl-KCl을 전해염으로 사용하며, 불순물 혼입에 의한 용융점 상승도 고려하여 운전온도는 약 500 °C로 한다. 충분한 TRU의 회수속도를 확보하기 위해, 전해염 중의 HM농도(HM중량/전해염중량)를 9 %정도로 연속 처리한다. 절단연료봉의 연료성분을 양극 용해시켜 고체음극에서 U석출물을 회수하면서 동시에 액체 Cd음극으로 U-TRU석출물을 회수한다. 이때 대표적인 원소는 그림 3.3에 나타난 바와 같이 산화환원전위를 가지기 때문에 전위를 적절히 제한하는 것으로 염화물 생성자유 에너지의 차를 이용하여 귀금속(NM) FP을 용해시키지 않고 양극바스켓에 피복관(hull)과 같이 잔류시킨다.

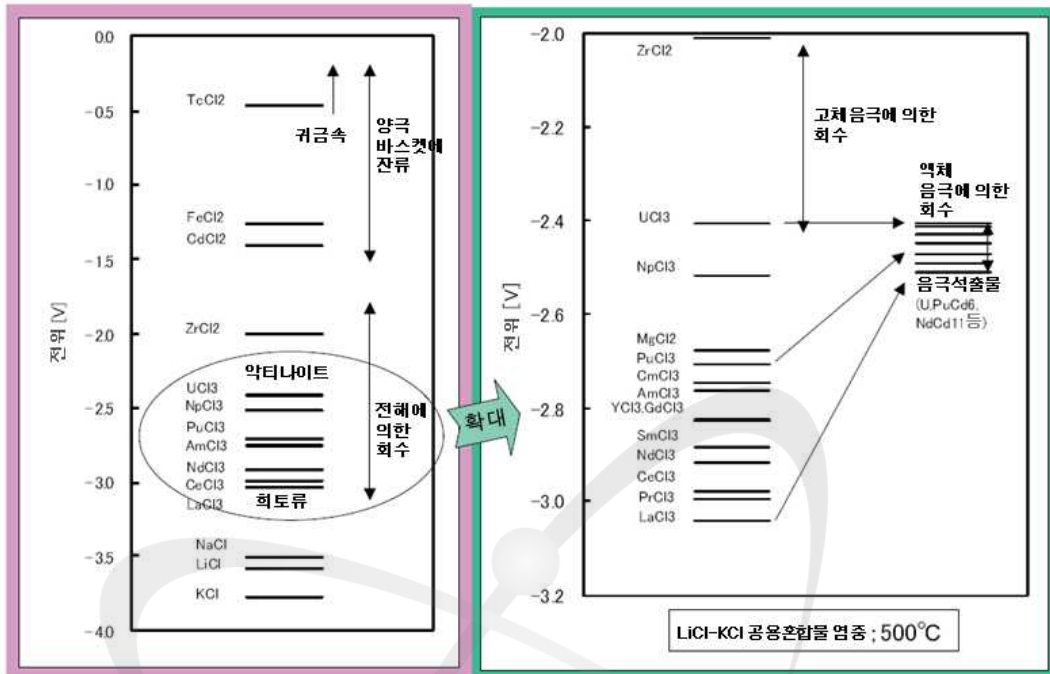


그림 3.3. 금속전해 시(500 °C) 주요원소의 전위.

○ 염처리, 폐기물처리

U-TRU 염화물의 환원제로 이용하는 Li-K를 Cd 중에 용해하여 U-TRU 염화물을 포함하는 전해염과 향류 접촉시켜 U-TRU금속을 Cd상 중에 환원 추출하여 회수한다. 여기서 폐기물량 저감의 관점에서 Cd 및 Li를 리사이클하는 프로세스가 필요하다. Cd 리사이클 프로세스에 대해서는 비교적 간단한 설비추가로 Cd 폐기물 발생량을 충분히 억제할 수 있기 때문에 이 방법을 적용하였다. Li리사이클 프로세스에서는 환원제 전해설비에서 발생하는 염소가스 리사이클 설비 및 요오드 제거설비를 설치할 필요가 있다. 또한 환원제의 Li/K 비를 조정하는 것으로 전해염을 구성하는 공정염화물의 Li/K 비를 일정하게 가지는 것이 가능하며, 더욱이 전해염 중의 NaCl 농도를 제한치 이하로 유지하기 위해 일정량의 전해염을 폐기할 필요가 있다. Li 리사이클 프로세스 추가시의 메리트는 작다고 판단되며, Li-K 환원제를 사용하는 방식을 적용하였다.

U-TRU를 회수한 후의 전해염 속에는 알카리 금속 FP, 알카리 토류 금속 FP, 희토류 FP 등의 염화물이 포함되어 있다. 이것들을 칼럼에 채운 Li 교환 제올라이트에 흡착시키는 것으로 전해염을 재생하여 리사이클 한다. Cd상 속에 추출된 U-TRU 금속은 재산화조에서 $CdCl_2$ 와 접촉시키는 것으로 재산화하여 염화물의 형태로 전해염에 용해시켜 전해정련조로 보낸다. FP를 흡착한 Li교환 제올라이트는 안정폐기물인 인공광물 고화체 (유리결합 소다라이트)로 전환하여 처분한다. 이때 Li교환 제올라이트에 부착한 전해염 및 제올라이트에서 소다라이트로 조직 변화할 때의 흡착량 차이로 발생하는 전해염 등을 포집하기 위해 건조 제올라이트를 추가한다. 그리고 소다라이트의 미세 틈을 유리로 채우기 위해 산화 처리한 페Na 본드 및 사용후물드를 원료로 하는 유리성분을 첨가한다. 이것들을 가열 혼합한 후, PC처리(약 $900\text{ }^\circ\text{C}$)하는 것으로 인공광물 고화체를 얻을 수 있다.

○ U 석출물, U-TRU 석출물의 처리

전해정련조에서 고체음극으로 회수한 U석출물은 고체 음극처리장치에서 가열저압처리하여 부착한 잔류염을 제거한 후, 가열하여 U-Zr 잉곳을 제조한다. 또한 액체 Cd음극으로 회수한 U-TRU 석출물은 Cd음극 처리장치에서 가열감압처리하여 Cd를 제거한 후, 가열하여 U-TRU-Zr잉곳을 제조한다. 이러한 잉곳은 연료제조공정으로 이송된다. 본 시스템에서는 ANL에서 개발된 회분식의 음극처리장치를 참고로 처리량의 증가에 대응하여 처리속도를 높이기 위한 승온, 냉각시간의 단축을 도모한 연속식을 적용하였다.

고체음극으로 회수한 U 석출물은 U-Zr 잉곳제조 장치에서 약 $1,400\text{ }^\circ\text{C}$, 50 Torr의 조건으로 용융처리하여 U-Zr 잉곳을 제조한다. 액체 Cd음극으로 회수한 U-TRU 석출물은 U-TRU-Zr 잉곳제조 장치에서 약 $700\text{ }^\circ\text{C}$, 100 Torr의 조건으로 금속 Cd을 제거한 후, 약 $1,150\text{ }^\circ\text{C}$, 100 Torr의 조건으로 합금 Cd를 제거하는 동시에

용융처리하여 U-TRU-Zr 잉곳을 제조한다.

○ 연료 중 Zr의 취급

사용후핵연료에는 노심연료 1 tHM 당 136 kg, 경 블랑켓 연료 1 tHM 당 113 kg의 Zr이 포함되어 있기 때문에 연간 4.5 t/yr(노심연료 3.6 t/yr, 경 블랑켓연료 0.9 t/yr)의 Zr이 처리된다. Phase I에서는 사용후핵연료의 Zr은 전부 전해정련공정에서 회수된다고 가정하였지만, Phase II에서는 최근 ANL의 시험 데이터 등을 고려하여 사용후핵연료의 Zr 10 %는 hull 등에 잔류하고, 70 %는 전해정련으로 전해염으로 용해한 후에 고체음극 및 액체 Cd음극에 회수되어 석출물에 동반하는 것으로 가정하였다. 나머지 20 %는 전해정련조의 Cd상 및 전해염에 잔류하게 된다. 잔류한 Zr에 대해서는 25일마다 Zr 전해운전을 실시하여 고체음극으로 회수하여 폐기물로 처리한다.

○ 드로스 처리

음극처리장치, 연료제조공정에서 사출성형장치부터는 HM과 도가니 보호용 코팅재(ZrO_2)의 반응에 의해 HM산화물이 주성분인 일명 드로스라고 불리는 물질이 발생한다. 이 드로스는 드로스처리장치로 음극처리장치에서 회수한 전해염과 혼합한 후, $ZrCl_4$ 및 금속 Zr을 사용해 HM염화물로 변환하여 전해정련조로 돌려보낸다.

○ Cd 증류 처리

전해정련조 전해염의 하단에 설치한 Cd 풀에는 음극 바스켓에 장전한 사용후핵연료에 포함된 Zr이나 FP의 일부(NM류)가 축적된다. 이 때문에 정기적으로 Cd 풀의 약 80%를 빼내어, 축적물의 분리처리를 실시한다. 이 장치로는 빼낸 Cd를 가열·감압하여 축적 정제한다. 정제 후, Cd를 다시 전해조로 이송한다.

2. 물질수지

앞에서 언급한 프로세스 개념을 기본으로 프로세스 흐름도(PFD)를 작성하여 물질수지를 평가한다. 금속핵연료 건식처리시설의 물질수지도는 그림 3.4에 나타낸 바와 같다.

Hull 잔류율, 액체 Cd음극의 분리계수, 제올라이트 흡착율 등의 물질특성에 근거하여, 악티나이드는 U, Pu, Am, Cm의 4가지 그룹으로 FP는 아래에 나타난 9개 그룹으로 나눠 평가한다.

- 알카리 금속(AL) : Rb, Cs
- 알카리 토금속(ALE) : Sr, Ba
- 희토류1 (RE1) : Y, Eu, Sm
- 희토류2 (RE2) : Ce, Pr, Nd, Pm
- 희토류3 (RE3) : La, Gd
- 귀금속 (NM) : Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn
- 할로젠 (HL) : I, Br
- 칼코젠 (KG) : Se, Sb, Te
- 희가스 (RG) : ^3H , Kr, Xe

가. 전처리

연료봉 전단공정 및 Na 본드 증류공정에서 발생하는 희가스는 완전히 분리되는 것으로 가정하였다. 또한 자료에 근거하여 Na 본드의 약 90% (드레인 처리로 약 50%, 열처리로 약 40%)이 제거된다고 가정했다. 이때 알카리 금속의 90%, 알카리 토금속의 10%, 할로젠의 50%, 칼코젠의 50%도 동시에 제거되는 것으로 가정하였다.

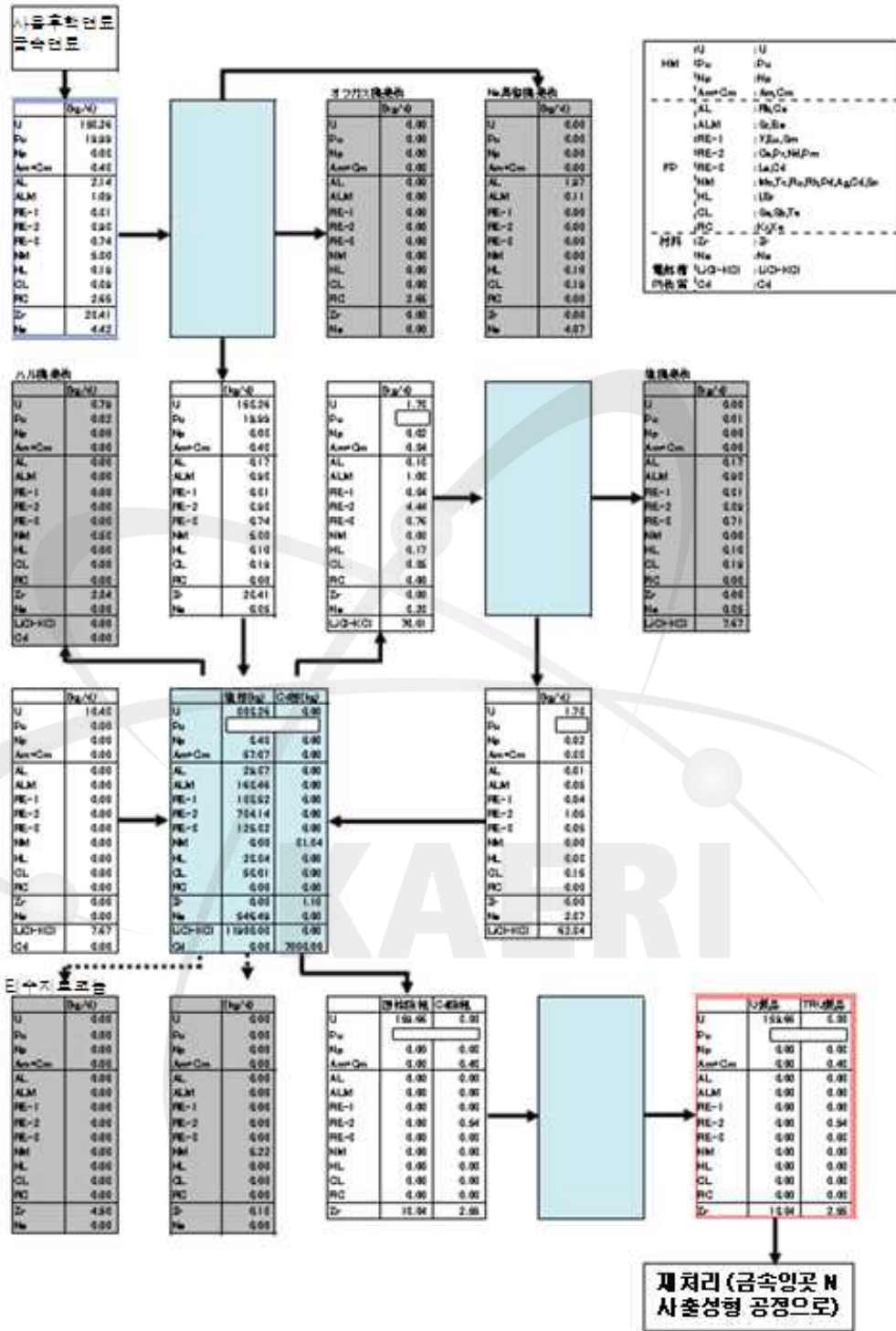


그림 3.4. 금속연료 리사이클 시설의 물질 수지도.

나. 전해정련

1기당 2,380 kg의 전해염과 1,400 kg의 Cd를 적재한 전해조에, 4개의 양극 어셈블리에 합계 36 kgHM/d의 사용후핵연료를 장전하여 3개의 고체음극과 1개의 액체 Cd음극으로 약 32 kgHM/d (약 10.6 kgHM/회 • 전극×3전극×1회/d)의 U석출물과, 약 6 kgHM/d의 U-TRU 석출물 (약 2.9 kgHM/회 • 전극×1전극×2회/d)을 동시에 회수한다. 또한 이 처리에 따르는 전해조 전해염 속의 악티나이드의 인벤토리(254 kgHM/기)의 감소량으로 U(UCl₃) 2 kgHM/d를 전해조에 보충한다.

(1) 양극

양극용해에 의한 전단 핵연료의 대부분인 U(99.5 %)는 UCl₃가 되어 전해염으로 용출되고, Pu 및 MA의 대부분(99.9 %)은 UCl₃과 교환반응하는 것으로 PuCl₃나 PuCl₄ 등의 화학형태로 용출된다. 또한 대부분의 Zr도 전해염으로 용해한다. 한편, 귀금속 FP는 거의 전해염으로 용해되지 않고 일부(10 %)만 hull에 잔류하며, 대부분(90 %)이 전해염 하부의 Cd상에 포집된다.

(2) 고체음극

고체음극에서는 수지상결정상의 U 석출물을 회수한다. 이 석출물에는 TRU 및 희토류 등의 FP는 동반하지 않지만, Zr의 거동에 따라 약 8 wt%의 Zr이 포함된다.

(3) 액체 Cd 음극

액체 Cd 음극에서는 각 원소의 산화환원전위의 차를 이용하여 U-TRU합금을 선택적으로 회수하지만 이때, 산화환원전위가 가까운 RE의 일부가 U-TRU 석출물에 혼입된다. 또한 위의 고체음극 석출물과 동일하게 이 U-TRU 석출물은 Zr(약 8 wt%)을 포함하고 있다. RE 등의 혼합

장전량은 분배실험 자료나 전해시험의 결과를 바탕으로 분리계수를 산출하여 평가하였다. 산출한 분리계수 (U를 기준으로 하는 값)를 아래에 나타냈다.

$$\text{분리계수} = \frac{C_X/C_U}{C'_X/C'_U}$$

C_X = 전해염의 원소 X의 중량농도 (wt%)

C'_X = 석출물의 원소 X의 중량농도 (wt%)

U = 1

Pu : 1.5

Np : 1.5

Am, Cm : 4

희토류1 : ∞

희토류2 : 45

희토류3 : 150

알카리 금속, 알카리 토금속, 귀금속 : ∞

다. 염처리 공정

전해정련조의 전해염의 FP 및 본드 Na 축적에 의해 제품에의 FP혼입이나 염욕의 융점상승을 회피하기 위해 6일에 1회의 빈도로 전해염의 3.5% (약 121 kg=67 L)를 빼내, 제올라이트 칼럼으로 선택적으로 FP를 제거하는 염처리를 실시한다.

(1) 환원 추출조

전해정련조에서 빼낸 전해염을 환원제인 Li-K를 첨가한 Cd상과 향류 접촉시키는 것으로 전해염의 HM염화물을 금속으로 환원하여, Cd상으로

이행시킨다 (Cd상 이행률 : U 99.996 %, Pu 99.89 %, MA 99.65~99.79 %). 이때 희토류의 일부도 환원되어 Cd상으로 이행한다. (희토류2 20 %, 희토류3 5.0 %)

(2) 제올라이트 칼럼

환원추출조에서 이송된 전해염을 제올라이트 칼럼에 통과시켜 알칼리 금속, 알칼리 토금속, 희토류, 할로젠, 칼코겐 등의 FP를 제올라이트로 흡착시켜 제거한다(흡착량; 알칼리 금속, 알칼리 토금속, 희토류 : 95~98 %, 할로젠, 칼코겐 : 50 %). 이때, 전해염의 FP 존재량이 적기 때문에 결과로서 FP 흡착량은 적어진다. 또한 전해정련조의 Na 농도를 10 mol% 이하로 유지하기 위해 제올라이트에 부착되는 양을 포함하여 약 10 %의 전해염을 폐기한다.

(3) 재산화조

환원추출조에서 이송된 Cd상에 산화제로 $CdCl_2$ 를 첨가하여, 제올라이트 칼럼에서 이송된 전해염에 접촉시켜 Cd상의 HM을 염화물로 전해염에 용해하여 전해정련조로 돌려보낸다. 산화제 $CdCl_2$ 는 Cd상의 HM산화반응에 따라 금속 Cd가 되기 때문에, HM분리 후의 일부 Cl_2 가스로 $CdCl_2$ 를 재생하는 것으로 리사이클링한다.

라. 음극처리 공정

증류 처리로 U 석출물에 부착되는 전해염이나 U-TRU 석출물과 합금을 형성하고 있는 Cd를 제거한다. 제조된 U-Zr 잉곳은 불순물을 포함하고 있지는 않지만, U-TRU-Zr 잉곳은 동반한 희토류 FP가 불순물로 혼입된다. 본 검토에서는 graphite제 도가니의 표면에 코팅한 ZrO_2 와 HM이 반응하여 발생하는 드로스는 슬래그제조공법의 사출성형장치에서 발생하는 드로스를 합해, 발생량을 제품 HM중량의 3 %정도로 가정하였다. 다만 뒤에서 서술할 드로스 처리로 전부 리사이클하기 때문에 폐기물이라고는

볼 수 없다.

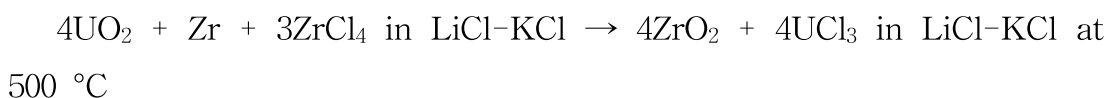
주요 핵종의 이행률은 표 3.1에 나타낸 바와 같다. U의 약 95 %는 U-Zr 잉곳, 약 5 %는 U-TUR-Zr 잉곳으로 이행한다. 한편 TRU는 거의 100 %가 U-TRU-Zr 잉곳으로 이행한다. FP의 대부분은 인공광물 고화체 등의 고준위폐기물이 되지만, FP 내 귀금속류는 hull 잔류물 등으로 혼합하여 TRU 폐기물화 한다. Zr의 약 70 %는 U-Zr 잉곳 또는 U-TRU-Zr 잉곳으로 이행한다. Na는 전부 고준위폐기물로 이행한다.

마. Zr 회수 전해

양극 바스켓에 장전한 사용후핵연료에서 전해정련조에 장전되는 Zr량은 합금성분량과 FP양을 합쳐 약 23.4 kg/d이다. Zr의 10 %는 hull에 잔류하고, 70 %는 고체음극 및 액체 Cd 음극에 의해 회수되지만 나머지 20 %는 전해염 및 Cd 풀에 축적된다. 통상 24일간 전해정련 운전을 한 후에 1일간 Zr 회수 전해운전 및 Cd 증류 처리를 실시하여 21.6 kg의 Zr을 회수한다.

바. 드로스 처리

음극처리장치, 연료제조공정의 사출성형장치에서 발생하는 드로스(주성분 : HM 산화물)를 HM 염화물 상태로, 전해정련조로 이송해 처리한다. $ZrCl_4$ 및 금속 Zr을 이용하여 아래의 대응 식에 따라 HM(아래 식은 U으로 대표)을 산화물에서 염화물로 변환한다.



본 검토에서는 음극처리 및 사출성형의 각 장치에서 총 제품중량의 약 3 wt%의 드로스가 발생하는 것으로 가정하였다. 이것으로 드로스 처리 후에 전해저장조로 이송되는 HM 중량은 UCl_3 환산으로 약 7 kg/d가 된다.

표 3.1. 금속전해법에서 FP 원소의 제품·환경방출·폐기물로의 이행률

원소명		제품		환경방출		폐기물	
		우라늄제품	TRU제품	대기방출	해양방출	인공광물 고화체	TRU폐기물
	H	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-01	9.00E-01	0.00E-00	0.00E+00
	C	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E-09	0.00E-00	0.00E+00
ALM	Rb	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Cs	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
ALE	Sr	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Ba	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
RE	Y	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	La	0.00E+00	3.75E-02	1.00E-13	1.00E-09	9.63E-01	0.00E+00
	Ce	0.00E+00	1.37E-01	1.00E-13	1.00E-09	8.63E-01	0.00E+00
	Pr	0.00E+00	1.37E-01	1.00E-13	1.00E-09	8.63E-01	0.00E+00
	Nd	0.00E+00	1.37E-01	1.00E-13	1.00E-09	8.63E-01	0.00E+00
	Pm	0.00E+00	1.37E-01	1.00E-13	1.00E-09	8.63E-01	0.00E+00
	Sm	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Eu	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Gd	0.00E+00	3.75E-02	1.00E-13	1.00E-09	9.63E-01	0.00E+00
	Tb	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Dy	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Ho	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
Er	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00	
NM	Zr	7.19E-01	1.32E-01	1.00E-13	1.00E-09	2.68E-02	0.00E+00
	Mo	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.22E-01
	Tc	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	Ru	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	Rh	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	Pd	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	Ag	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	Cd	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	In	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	Ge	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
CC	Sn	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	9.00E-01	1.00E-01
	As	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Sb	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Se	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
HG	Te	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
	Br	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-13	1.00E-09	1.00E+00	0.00E+00
NG	I	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-02	0.00E-00	9.90E-01	0.00E+00
	Kr	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E-00	0.00E+00	0.00E+00
AN	Xe	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E-00	0.00E+00	0.00E+00
	U	9.46E-01	4.92E-02	1.00E-13	1.00E-09	4.12E-07	4.69E-03
	Np	0.00E+00	9.99E-01	1.00E-13	1.00E-09	2.87E-04	1.00E-03
	Pu	0.00E+00	9.98E-01	1.00E-13	1.00E-09	5.48E-04	9.99E-04
	Am	0.00E+00	9.97E-01	1.00E-13	1.00E-09	2.37E-03	9.98E-04

주) ALM : 알카리금속, ALE : 알카리토금속, RE : 희토류, NM : 귀금속, CC : 칼코겐, HG : 할로젠, NG : 희가스, AN : 악티나이드

사. Cd 증류 처리

전해저장조의 전해염의 하단부에는 Cd 풀(Cd량 : 1,400 kg)이 설치되어 있다. 여기서는 사용후핵연료에 포함되는 NM 및 Zr이 추적되어 있기 때문에 이것들을 정기적으로 분리하는 처리를 실시한다. 구체적으로는 전해조를 25일간 운전 후, Cd 풀의 80 %를 빼내 Cd 증류 처리장치로 이송한다. Cd 증류 장치에서는 증류 처리로 NM 및 Zr을 분리하고 정제한 Cd은 전해정련조로 이송하여 재사용한다.

3. 처리제품과 제염계수

처리제품은 고체음극처리장치로 회수되는 U-Zr 잉곳과 Cd 음극 처리장치로 회수되는 U-TRU-Zr 잉곳의 2가지 종류가 있다. 건식처리제품에 혼입되는 불순물은 금속핵연료 슬래그를 구성하는 Zr을 제외하면 Ce, Pr, Nd, Pm, La, Gd 등의 희토류로, 이들의 평균 제염계수는 8이상이다. 물질수지평가결과에서 요구한 건식처리제품의 연간 생산량, U와 TRU의 회수율, FP 혼입률(금속핵연료를 구성하는 Zr 제외)은 표 3.2에 나타난 바와 같다. U와 TRU의 회수율은 설계요구의 99 % 이상 조건을 만족하고 있다. 또한 U-Zr 잉곳과 U-TRU-Zr 잉곳을 원료로 Pu 부화도 조절을 하여 제조할 불량켓을 빼고 노심연료 슬래그의 FP 혼합장전량은 0.3 wt%가 되며 노심 설계요건 1.2 wt% 이하를 만족한다.

4. 폐기물

가. 환경방출

기체 및 액체 상태로 환경에 방출되는 주요 FP의 처리 흐름은 그림 3.5 및 그림 3.6에 나타난 바와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 전처리 공정, 전해분리공정 등에서의 오프가스는 Ar 가스의 미립자, 휘발성 및 준휘발성 FP를 포함하고 있으며 요오드(I), 세슘(Cs), 트리튬(^3H)을 제거한 후에 배기관에서 방출된다.

표 3.2. 금속연료의 금속전해법에 의한 건식처리제품과 U, TRU 회수율

(38 tHM/yr 처리용량 기준)

건식처리제품	제품중량(FP 혼입율)
U-TRU-Zr 잉곳	HM : 5.5 t/yr U : 1.6 t/yr Pu : 3.8 t/yr MA : 0.1 t/yr (2.0 wt%) FP* : 0.1 t/yr Zr : 0.5 t/yr
U-Zr 잉곳	HM : 30.7 t/yr U : 30.7 t/yr Zr : 2.7 t/yr
U, TRU 회수율	
U**	99.5%
TRU	99.9%
TRU 회수율	
Np	99.7%
Pu	99.9%
Am	99.7%
Cm	99.7%

* 금속연료(U-Zr, U-TRU-Zr)의 성분인 Zr을 제외한 FP 혼입율

** 전해염 조정용으로 첨가한 UCl₃도 고려한 회수율

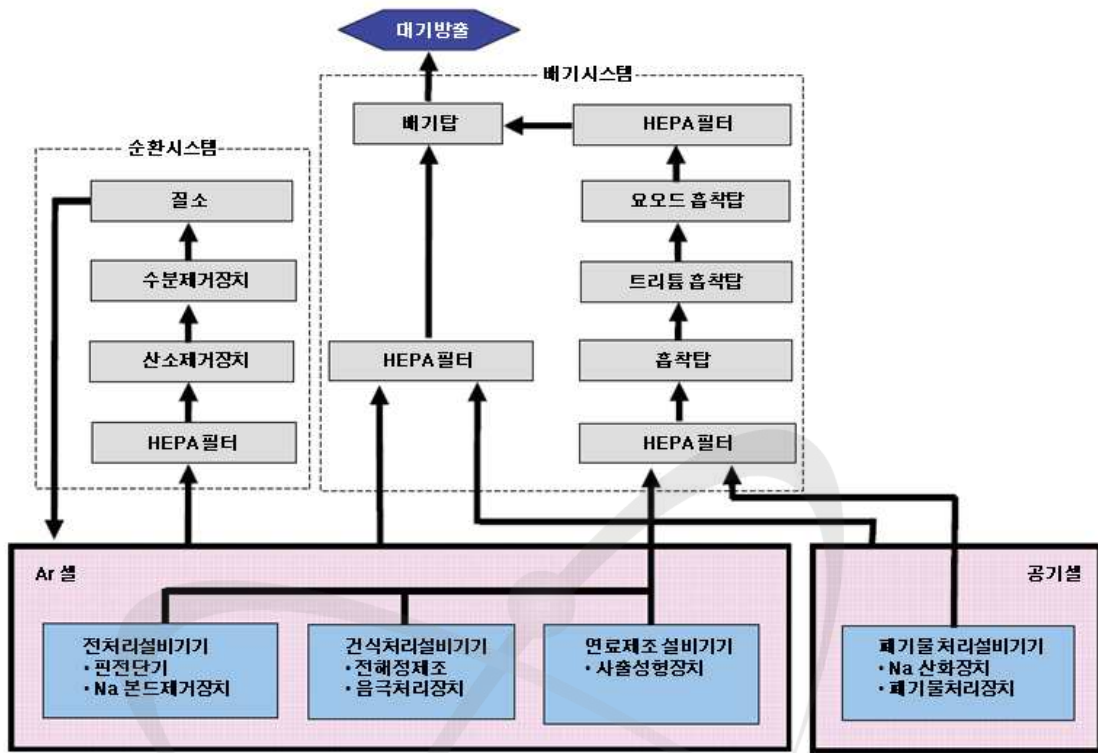


그림 3.5. 환경방출 기체폐기물처리 흐름도.

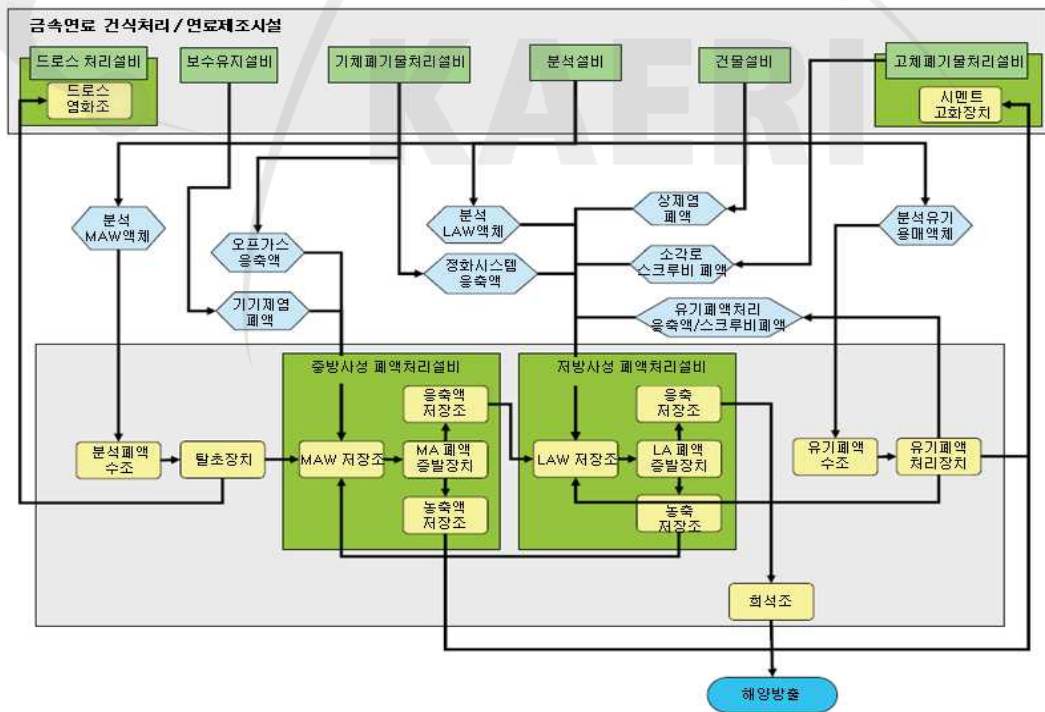


그림 3.6. 환경방출 액체폐기물처리 흐름도.

I의 약 50%는 Na 본드 제거공정에서 Na과 동시에 제거되어 인공광물 고화체의 유리성분에 고정시킨다고 가정한다. 나머지 50%의 I은 전해정련조의 전해염으로 이송되어 리사이클 공정에서 제올라이트 칼럼에 흡착되어 인공광물 고화체의 소다라이트 내에 고정된다. 건식처리시설과 습식 재처리시설에서 발생하는 단위발전량 당 ^{85}Kr , ^{14}C , ^3H , ^{129}I 방출량의 비교표를 표 3.3에 나타냈다. 본 시설에서 습식 재처리시설과 동일하게 ^{85}Kr , ^{14}C 의 제거설비를 설치하지 않았기 때문에 단위발전량 당 방출량은 발생량과 동일하다. 한편 ^3H 의 경우, 습식재처리시설에서의 방출량과 거의 동일하기 때문에 트리튬 제거장치를 설치하여 ^3H 의 대부분을 회수해서 액체 폐기물 처리시스템을 이용해 해양 방출하는 것으로 가정하였다.

그림 3.6에 나타난 바와 같이 액체 폐기물은 용매의 종류와 함유 방사능 수치에 따라 분석 폐액, 중방사성 폐액, 저방사성 폐액, 유기폐액으로 나뉘어 처리한다. 분석 폐액은 탈초장치로 HM성분을 분리 회수한 후 응축액은 중방사성 폐액으로 MAW 저장조로 이송한다. 중방사성 폐액 및 저방사성 폐액은 증발장치(합계 2기)로 처리하며, 응축액은 회석하여 해양방출하고 농축액은 시멘트 고화하여 TRU 폐기물화 한다. 또한 ^3H 은 트리튬 제거장치에서 ^3H 의 90%가 제거되어 응축액으로 이행하여 해양 방출한다고 가정하였다. 다만, ^3H 회수의 상세(회수율 등) 공정은 향후 검토과제로 남았다. 그리고 트리튬 제거장치에서 제거되는 ^3H 의 대부분은 응축액에 이행하여 해양 방출된다고 가정한다. 유기폐액은 유기폐액처리장치로 분해 처리되어 저방사성 폐기물 처리시스템으로 운반된다.

나. 프로세스 폐기물

각 공정에서 발생하는 프로세스 폐기물의 폐기물 발생량을 표 3.4에 정리하여 나타냈다. 고준위폐기물, TRU 폐기물, 고 $\beta\gamma$ 폐기물의 구분은 기초로 한 표 3.4에 정리한 폐기물 발생량의 근거에 대해 아래에 서술한다.

표 3.3. 금속연료 건식처리시설(38 tHM/yr)과 록카쇼 재처리시설에서 대기 또는 해양에 방출되는 주요 핵종 방사능량 비교

핵종	금속연료 건식처리시설 (38 tHM/yr)		록카쇼 재처리시설 (800 tHM/yr)	비고
	반입량 ⁽²⁾ (Bq/GWd)	방출량 ⁽²⁾ (Bq/GWd)	방출량 ^(1,2) (Bq/GWd)	
⁸⁵ Kr	1.2×10^{13}	1.2×10^{13} (대기방출)	2.7×10^{13} (대기방출)	인수량은 4년간 냉각한 사용 후 핵연료 중의 핵종중량을 바탕으로 산출
¹⁴ C	$1.2 \times 10^{9(3)}$	1.2×10^9 (대기방출)	4.2×10^9 (대기방출)	
³ H	1.5×10^{12}	$1.3 \times 10^{11(4)}$ (대기방출)	1.5×10^{11} (대기방출)	
		$1.2 \times 10^{12(4)}$ (해양방출)	1.5×10^{12} (해양방출)	
¹²⁹ I	1.3×10^8	$1.1 \times 10^{4(5)}$ (대기방출)	8.9×10^5 (대기방출)	
			3.5×10^6 (해양방출)	

- 1) 선행습식처리시설의 방출량 자료는 「록카쇼 재처리시설 사업지정 신청서 첨부서류」에 근거함.
- 2) 금속연료 건식처리 시설 및 록카쇼 재처리시설이 인수하는 사용후핵연료의 평균 연소도는 94.2 GWd/t 및 45 GWd/t으로 Bq/GWd 단위의 인수량, 방출량으로 환산하였다.
- 3) 금속연료에 포함되는 불순물 질소량을 50 ppm으로 가정하여 산출하였다.
- 4) 오프가스 처리설비에 트리튬 제거장치 (DF=10)를 설치하여, 사용후핵연료의 트리튬 약 90 %를 해양 방출하는 것으로 가정하여 대기방출을 약 10 %저감한다(트리튬은 배기측 오프가스 처리설비로 거의 100 % 이행하지만, 오프가스 처리설비의 트리튬제거장치에서 90 % 제거된다. 트리튬제거장치에서 회수한 90 %(응축액)은 폐액처리설비를 거쳐 해양으로 방출된다).
- 5) 사용후핵연료에 포함되는 요오드의 99 %는 인공광물 고화체로 이행한다. 나머지 1 %는 오프가스시스템으로 이행하지만 오프가스 처리설비의 요오드 제거장치 (DF=100)로 대부분이 제거된다.

표 3.4. 금속연료 리사이클 플랜트의 주요 폐기물량

폐기물구분	주요 프로세스 폐기물	발생량(t/yr)	폐기체량
고준위 폐기물	폐본드 Na	1.2	18.9 m ³ /yr 127캐니스터/yr (150 L/캐니스터)
	염내포 제올라이트	6.9	
	건조 제올라이트	21.5	
	분말유리 (연료제조의 폐몰드 함유)	9.5	
	합계	37.9	
TRU 폐기물	Cd 음극도가니	4.0	6.8 m ³ /yr 34 드럼통/yr (200 L/드럼통)
	선단 플레넘	12.8	
	NM 폐기물	1.0	
	드로스 폐기물	2.0	
	회수 Zr	0.9	
	음극처리용 프로세스 도가니 사출성형도가니(연료제조)	22.1	
	hull	3.3	
합계	46.1		
고βγ 폐기물	집합체 부재	55.5	21.4 m ³ /yr 107 드럼통/yr (200 L/드럼통)
	합계	55.5	
비고	<p>① NM 폐기물은 FP붕괴로 발열량이 커지고 고준위폐기물에 상당한다고 생각되지만 다른 TRU 폐기물 등과 혼합 희석한다고 가정하여 TRU 폐기물로 가정하였다.</p> <p>② 각 폐기물의 캐니스터, 드럼통의 충전률 등은 다음과 같다.</p> <ul style="list-style-type: none"> · 선단 플레넘 및 hull (SUS제)의 밀도는 7.9 g/cm³, 압축처리로 감용률은 1/2로 가정하였다. · NM 폐기물의 밀도는 10 g/cm³으로 가정하였다. · 드로스폐기물의 밀도는 5 g/cm³으로 가정하였다. · 인공광물 고화체 밀도는 2 g/cm³으로 가정하였다. <p>③ 음극처리용 프로세스 도가니 및 사출성형 도가니는 소각처리한 후 소각재는 시멘트유리에 혼입된다.</p> <p>④ 분석설비의 폐액은 TRU 폐기물로 시멘트유리에 혼입한다.</p> <p>⑤ 음극 바스켓은 리사이클 사용하는 것을 고려하여 위에 포함하지 않았다.</p>		

(1) 고준위폐기물

고준위폐기물의 처리 흐름은 그림 3.7에 나타났다. 고준위로 구분되는 폐기물은 FP 흡착 제올라이트, 폐기전해염(제올라이트 칼럼 부착염 포함), 폐 Na 본드, 사출성형 몰드(연료제조)가 있다. 제올라이트 칼럼에 충전하는 Li 교환 제올라이트의 연간 사용량은 약 3.9 t/yr로 Li교환 제올라이트의 이온교환 반응 및 흡착 반응으로 전해염에서 제거 가능한 FP양은 약 1.7 t/yr이 발생한다. 이 폐기 전해염과 제올라이트의 소다라이트 고화처리에 따라 부생성물로 발생하는 염화물을 고정하기 위해 약 21.5 t/yr의 건조 제올라이트가 추가로 필요하다. 산화처리 한 폐Na 본드 약 1.2 t/yr과 사출성형 몰드 약 8.0 t/yr 등을 원료로 한 유리분말을 약 9.5 t/yr를 추가하여 FP성분 4.3 wt%, 유리성분을 약 25 wt%를 함유하는 인공광물 고화체 (유리결합 소다라이트)를 제조한다. 소다라이트는 알루미늄규산염의 바구니 구조를 가지며, FP를 포함하는 전해염을 밀봉 안정화하는 물질을 가진다. 인공광물 고화체의 발생량은 37.9 t/yr이며, 용량 150 L의 캐니스터에 적재한다. 인공광물 고화체의 밀도는 2 kg/L 정도이며 1년간 발생하는 인공광물 고화체의 캐니스터 수는 127개이다.

(2) TRU 폐기물

TRU 폐기물의 처리 흐름은 그림 3.8에 나타났다. TRU 폐기물로 구분되는 프로세스 폐기물은 전해정련조에서 사용한 Cd음극 도가니, 전단 플레넘, Cd 증류 처리 후의 NM 폐기물, 드로스 처리 후의 드로스 폐기물 (ZrO₂ 등), 음극처리장치로 사용한 음극처리용 프로세스 도가니와 사출성형 도가니 (연료제조), hull이 있다. Cd 증류 처리 후의 NM은 고준위 방사성폐기물에 상당한다고 생각되지만 FP의 반감기가 비교적 짧은 것 (¹⁰⁶Ru : 반감기 371일)을 고려하여, 여기서는 방사능의 감쇠 후, 다른 폐기물과 혼합 회석하여 TRU 폐기물로 취급하는 것으로 가정하였다. 발생량은 액체 Cd음극 도가니 4.0 t/yr, 전단 플레넘 12.8 t/yr, NM폐기물 1.1 t/yr, 드로스 폐기물 2.0 t/yr, 회수 Zr 0.9 t/yr, 음극처리용 프로세스 및 사출성형 도가니 22.1 t/yr, hull 3.3 t/yr로 합계 46.1 t/yr이다.

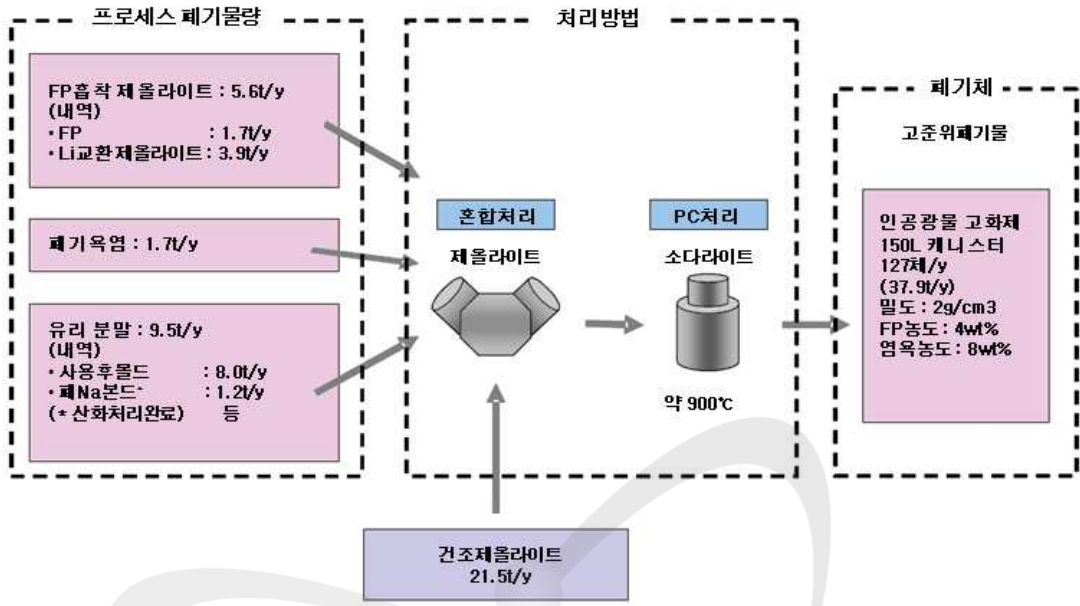


그림 3.7. 고준위 방사성폐기물 처리 흐름과 폐기물 발생량.

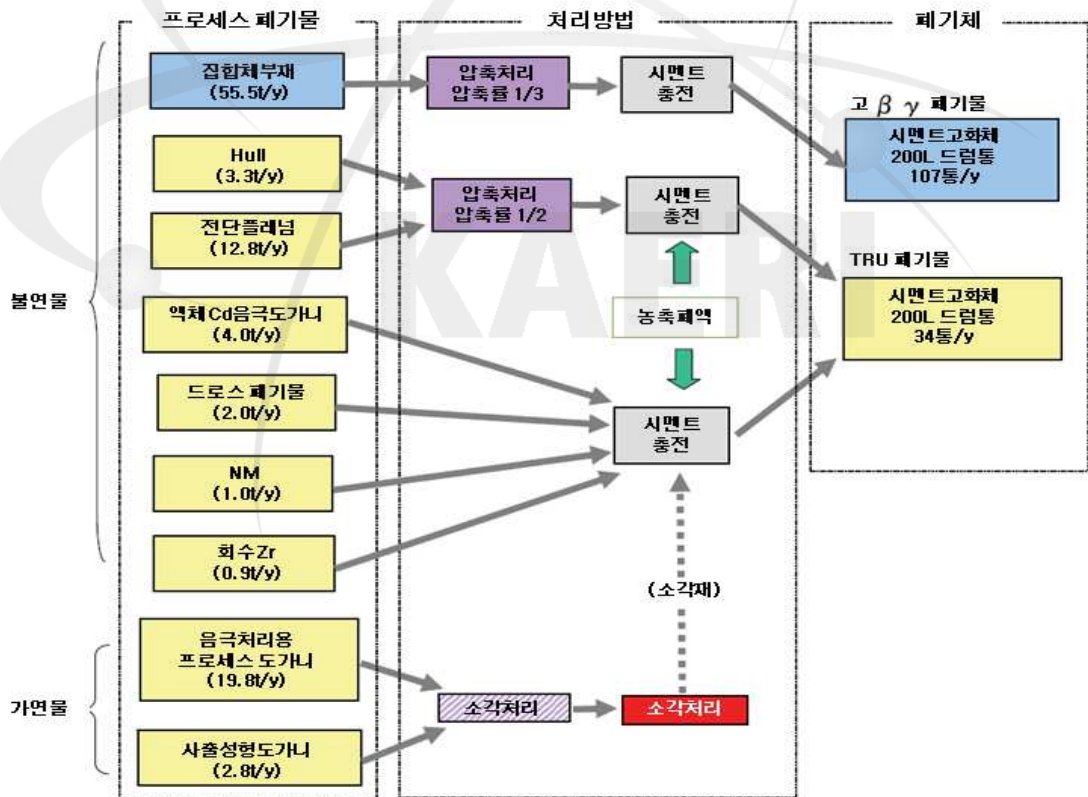


그림 3.8. 고βγ폐기물 및 TRU 폐기물의 처리 흐름과 폐기물 발생량.

Hull과 전단 플레넘은 압축처리 후, 드럼통에 채워 시멘트 고화하고 액체 Cd 음극 도가니, NM폐기물, 드로스 폐기물, 회수 지르코늄은 드럼통에 채워 시멘트 고화한다. 사용후 음극처리용 프로세스 도가니 및 사출성형 도가니는 모두 graphite이므로 분쇄 후에 소각 처리하여 감용한다. 소각 후의 재는 시멘트 고화용 시멘트에 섞는다. TRU 방사성 폐기물의 연간 발생량은 용량 200L 드럼통으로 34 EA/yr이다.

현재, ANL에서는 NM 폐기방법으로 Cd 증류 후의 NM 폐기물에 hull 및 전해 회수한 Zr을 혼합한 고준위 합금고화체(SS-15%Zr-4%FP)를 개발하고 있다. 이것을 계속 진행하여 NM 폐기물 고준위폐기물로 하였을 경우, 폐기물 처리 설비의 재검토와 이러한 재검토에 따른 폐기물량의 재평가를 필요로 한다.

(3) 고 $\beta\gamma$ 폐기물

집합체부재 중에서 직접 핵물질과 접촉하지 않은 나팔관 등이 고 $\beta\gamma$ 폐기물이 된다. 이것들의 연간 발생량은 55.5 t/yr 이다. 고 $\beta\gamma$ 폐기물의 처리 흐름을 그림 3.8에 나타냈다. 집합체 부재는 드럼통에 채워져 시멘트 고화한다. 이 폐기물의 연간 발생량은 용량 200 L 드럼으로 환산, 107 드럼이 된다.

5. 장치설계

가. 설계 방침

앞에서 언급한 설계조건 및 아래에 설명하는 설계방침에 기초하여 장치를 설계한다.

(1) 안전설계

기본적으로 건식처리 특유의 안전대책을 고려한 설계로서 안전상 중요한 시설은 이중화한다.

(2) 내진설계

전해정련조 등의 주요 기기는 적재하는 방사성물질의 특성과 양, 내진 등급에 맞는 설계를 실시한다.

(3) 임계 안전설계

전해정련조 등 임계상 유의한 핵물질을 취급하는 기기에 대해서는 물질관리 등을 적용하여 임계 안전 설계한다. 또한 연료의 인수·저장은 형상, 길이 관리를 적용하여 설계한다.

(4) 화재·폭발방지의 설계

안전상 중요한 시설은 원칙적으로 불연성 또는 난연성 재료를 사용하여 설계한다. Na이나 금속핵연료 등을 쓰는 기기, 장치 등은 불활성 Ar gas 내에서 취급함과 동시에 이상가열 등을 방지할 수 있도록 설계한다.

(5) 밀봉 기능 (누설 방지 포함)

전해정련조 등 방사성물질을 수납하는 용기의 사용재질은 내식성 Cr-Mo 강재나 내식성 비Ni 스테인레스 강 등 사용조건에 맞춰 적절한 재료를 선정하여 요구되는 건식처리용기 구분에 맞춘 용접, 검사를 가정하여 설계한다. 또한 이러한 용기 등은 통상의 운전 상태에서는 부압유지가 곤란한 경우가 있기 때문에 셀 내를 밀봉 설계한다.

(6) 기기 등의 운전·유지보수

안전상 중요한 시설은 안전기능을 확인하기 위해 필요에 따라 운전 중 또는 정기 검사 시 중지된 상태에서도 안전기능의 손상 없이 적절한 방법에 의한 점검 및 검사를 할 수 있도록 설계한다. 기기의 운전은 자동운전

을 기본으로 한다. 핵연료 등 물질의 이송은 모두 셀 내에서 이루어지기 때문에 원격조작을 기본으로 한다. 또한 물질 이송은 대차, 파워 머니플레이터 등으로 수행하며, 기기와 이송기기와의 물질 취급과 관련된 기기는 각 물질 이송의 작업성을 고려하여 기기 또는 이송기기에 맞춰 부가한다.

유지·보수에 있어서는 기기설치 위치 및 셀 내의 유지 구역에서의 원격 보수유지를 원칙으로 원격 보수유지가 곤란한 경우를 고려하여 기기의 제염 후에 접촉보수 및 유지가 가능하도록 하기 위해 보수동선 등도 고려하여 설계한다. 구체적으로는 인셀 크레인, 파워 매니플레이터 등의 원격 조작기기를 이용하여 보수유지 대상기기를 해당 장소에서 원격으로 유지 구역으로 반출하여 직접 보수한다.

(7) 전원상실 고려

안전상 중요한 시설 중에서 안전기능을 확보하기 위해 전원을 필요로 하는 경우에는 필요전원으로서 외부전원시스템 및 비상용 소내 전원시스템을 갖추도록 설계한다. 비상용 소내 전원설비는 단일 고장을 가정하여 독립된 2개의 시스템으로 설계한다.

나. 공용 고려

안전상 중요한 시설은 연료제조시설 등과의 공용으로 안전기능을 상실하는 경우가 발생하지 않도록 설계한다.

다. 기기·설비설계

각 설비의 주요 기기의 사양은 표 3.5에 나타냈다. 그리고 아래에 주요 기기의 기수, 용량, 처리량 등의 사양에 대해서 설명한다. 장치 중에서 드로스 처리시설, 오프가스 처리시설, 폐기물 처리·저장시설, 분석시설, Ar 셀 내 가스냉각·정화시설, 냉각수 설비·냉수설비는 전해처리시설과 연료제조시설이 서로 공용하는 설비이다.

표 3.5. 주요기기의 사양(금속연료 금속전해 처리시설, 38 tHM/yr)-1/2

설비	주요기기	처리능력	수량
사용후핵연료 저장설비	사용후핵연료 저장피트 (냉각설비 있음)	200집합체 저장 노심연료 : 167집합체 블랑켓연료 : 32집합체	1
사용후핵연료 인수·전처리 설비	사용후핵연료 임시보관 피트 (냉각설비 있음)	20집합체 저장 (약 20일분)	1
	집합체 해체기	2h/집합체	1
	핀전단기 (와이어제거 장치 있음)	(드라이버 0.8집합체 + 블랑켓 0.2집합체)/d	1
	Na본드 제거장치	20바스켓/d	1
전해분리설비	전해정련조 (전기가열방식)	4양극바스켓+3고체음극+ 1액체Cd음극 고체음극 : 10 kgU/d 액체Cd음극 : 2.9×2 kgHM/d	5
	고체음극처리장치 (유도가열방식)	8도가니/d (160 kgHM/d)	1
	Cd음극 처리장치 (유도가열방식)	10도가니/d (29 kgHM/d)	1
	Cd증류 장치 (전기가열방식)	Cd증량 : 1,120 kg/d	1
염처리설비	TRU환원추출기	18.7hr/배치, 3단	1
	재산화조	용량 140 L	1
	제올라이트칼럼	1hr/배치×5배치/d	1
드로스처리 설비	드로스염화조	용량 200 L	1
오프가스처리 설비	HEPA 필터	유량 200 Nm ³ /h	4
	Cs/Ru 흡착탑	유량 200 Nm ³ /h	2
	트리튬제거장치	유량 200 Nm ³ /h	1
	요오드흡착탑	유량 200 Nm ³ /h	2

표 3.5. 주요기기의 사양(금속연료 금속전해 처리시설, 38 tHM/yr)-2/2

설비	주요기기	처리능력	수량	
폐기물처리· 저장설비	인공광물고화장치	1캐니스터/d	1	
	압축장치	단축미가압(短軸微加壓) 약 1 psia	1	
	시멘트고화장치	시멘트 충전고화 약 1드럼/일	2	
	소각로	최대처리능력 약 500 kg/일	1	
	용융로	최대처리능력 난연물 약 50 kg/h, 금속 약 180 kg/h	1	
	캐니스터 저장창고 (공냉팬 냉각설비 있음)	160개 수납		
	드럼 저장랙	수납수 100드럼/hull 외 100드럼		
분석설비	용해장치, 불순물제거장치, 전위차측정기, 전량기, 질량분석기, K-edge+형광X선분석기, α스펙트럼미터, γ스펙트럼미터 등	<ul style="list-style-type: none"> · 품질관리용 분석 (U, Pu, 동위체, MA 등) · HM 분석 (U, Pu) · FP 분석 (α핵종, γ핵종, 불순물) · 계량관리용 (U, Pu, 동위체) 		
Ar 셀 냉각·정화 설비	HEPA필터	유량 약 200 Nm ³ /h	4	
	Ar 가스 냉각기	약 1,300 kW	2	
	Ar 가스 정화장치 (산소제거, 수분제거, 질소제거)	산소제거 수분제거 질소제거	1	
냉각수·냉수 설비	냉각수용 냉각탑 유닛	약 1.5×10 ⁶ kcal/h	2	
	냉수용 냉동기 유닛	약 1.35×10 ⁶ kcal/h (약 450 USRt)	2	
보수설비	크레인	천장 크레인	정격하중 100t/5t/2t	6
		I/C크레인	정격하중 5 t	28
		P/M크레인	정격하중 100 kg	6
	마스터슬레이브 매니플레이터	취급하중 23 kg	140	
	모노레일 호이스트	정격하중 5t/2t/1t	7	

(1) 사용후핵연료 저장시설

(가) 사용후핵연료 저장피트

설계사양에 근거하여, 1년분 사용후핵연료 199집합체(노심연료 167집합체와 경방향 블랭킷 연료 32집합체)를 건식저장 할 수 있는 저장크기로 한다. 임계계산을 실시하여, $K_{\text{eff}}=0.95$ 이하가 되도록 피치수치를 고려하여 저장피트를 설치한다. 이중 시스템의 냉각설비로 저장피트 내의 공기를 순환시켜 사용후핵연료의 제열을 실시한다. 또한 연료 핀 표면에 부착한 Na는 미리 제거하여 사용후핵연료 저장피트는 공기분위기로 했지만, 연료표면의 Na제거의 정도에 따라 사용후핵연료 저장피트를 불활성 가스분위기로 할 필요가 있다.

(2) 사용후핵연료 인수·전처리 시설

사용후핵연료 저장피트에서 사용후핵연료를 인수하여 연료집합체의 해체, 연료핀에서의 와이어제거, 연료 핀의 전단, 전단편 및 전단 플레넘 중에 포함되는 Na 본드 제거, 전단편의 전해정련공정으로의 이송 등에 필요한 기기이다. 기기의 재질은 스테인레스강으로 한다.

(가) 사용후핵연료 임시보관 피트

설계요건에 근거하여 약 2주간의 처리량(기기의 고장 시 회복 시간 가정에 상당하는 사용후핵연료 집합체 14다발을 보관할 수 있는 용량을 가지는 피트로 한다. 사용후핵연료 임시보관 피트의 수치는 사용후핵연료 저장피트의 경우와 같다. 또한 이중 시스템의 냉각설비로 냉각된 Ar을 피트 내에 순환 공급하여 사용후핵연료의 제열을 실시한다.

(나) 집합체 해체기

집합체 해체기는 잘못 전단한 금속핵연료 및 Na 본드에서의 화재발생을 고려하여 Ar 셀 내에 설치한다. 집합체 해체방식으로 기계식과 레이저

식이 있지만 현재 FBR 연료의 해체용으로 개발되어 있는 레이저는 보조 가스로서 산소를 사용하기 때문에 Ar 가스 분위기 중의 산소농도를 상승시킬 가능성이 있다. 따라서 기계식 집합체 해체기를 적용하였다.

(다) 핀 전단기

연료집합체를 해체한 후 연료 핀을 기계식 전단기로 전단하여 전단편을 양극바스켓에 장전한다. 장전량 계량관리의 관점에서 전단편의 일부를 조성분석용의 샘플로 채취해 타 양극 바스켓에 장전한다. 후속 공정인 전해정련조의 용해를 촉진시키기 위해 전단편 길이를 노심연료는 약 10 mm, 블랑켓 연료의 약 30 mm로 한다.

(라) Na 본드 제거 장치

전단편 및 전단 플레넘에 포함되는 Na 본드의 제거를 실시한다. ANL에서는 600 °C, 10^{-3} Torr 조건으로 블랑켓 연료(미조사)를 사용해서 Na 본드를 99 % 제거할 수 있는 것을 확인하였다. 하지만 고연소도 금속핵연료의 Na 본드는 분열반응에 따라 연료 중에 생기는 공기 틈에 침투되어 있다고 생각되며 Na제거율은 처리조건과 함께 연료의 조사상황에 의존한다고 생각된다. 본 검토에서는 보수적으로 Na제거율을 약 90%(처리 조건 : 500 °C, 0.2 Torr, 6시간 처리)로 가정하였다. 이 감압온도 이하로 처리시 휘발성 및 준휘발성 FP도 제거되는 것으로 가정했다. 고연소도 금속핵연료 Na본드를 충분히 제거하는 조건은 향후 추가 검토할 필요가 있다.

(3) 전해 분리 설비

본 설비는 전해정련조, 고체음극 처리장치, Cd음극 처리장치 등의 기기로 구성된다.

(가) 전해정련조

Phase II에서 설계한 전해정련조의 외형도를 그림 3.9에 나타냈다. ANL-FCF설계의 전해조를 대형화하여 지지구조물 및 전극 조작부를 포함 5.0 m×2.4 m×3.9 mH 정도이다. 레일 위를 이동하는 전극장전장치의 접근을 용이하게 하기 위해 전해정련조는 상자구조로 응력집중이 발생하기 쉬운 구조로 되어 있다. 전해정련조의 열응력 해석을 실시하여 각부에 충분한 곡률을 갖도록 적절하게 대응하여 통상 운전 시의 건전성이 확보된다는 것을 확인하였다. 전해정련조에는 HM염화물을 함유한 LiCl-KCl의 하단부에 Cd 풀을 설치하여 양극 바스켓에서 HM 및 귀금속 FP의 일부가 낙하해도 작업 중에 회수되도록 하였다. 반응조에 저장하는 LiCl-KCl은 2,380 kg, Cd는 1,400 kg으로 Cd 풀상은 약 0.1 m, 용융염상이 약 0.4 m, 기상부가 약 0.5 m가 된다.

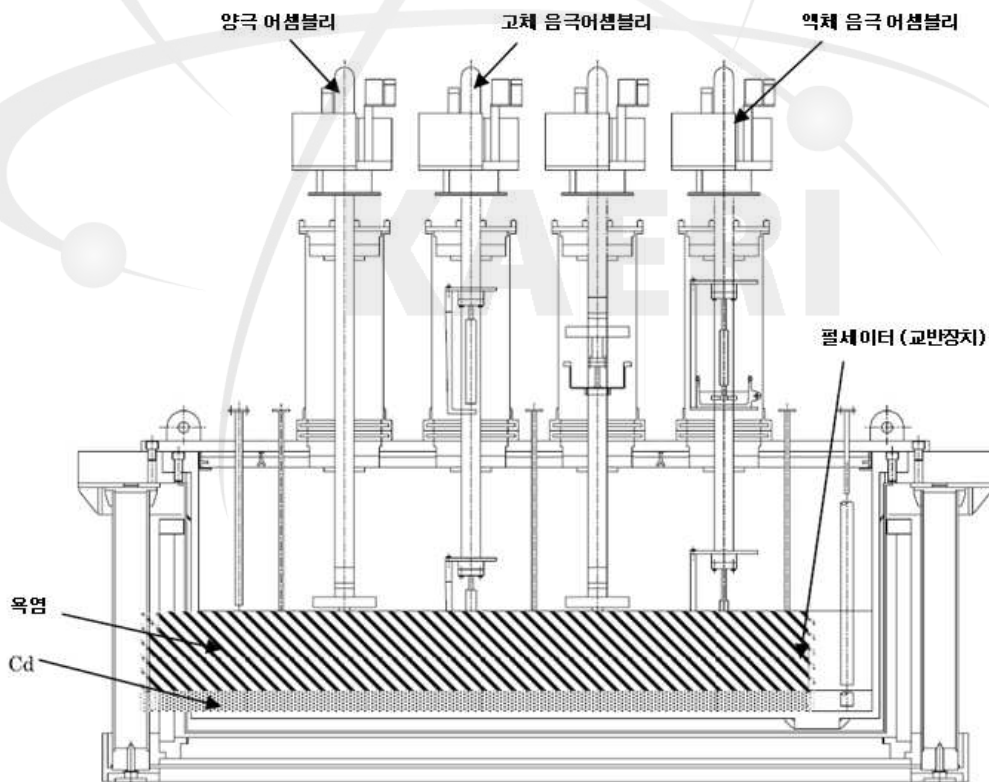


그림 3.9. 전해정련조 외형도.

전해조의 임계 안전관리는 임계 계산 모델(용융염 속에 양극 4개, 액체 Cd음극 1개, 고체음극 3개의 계산체계)을 작성하여 평가를 실시하였다. 그 결과 정상 전해운전 시, Pu를 전부 ^{239}Pu 로 가정하여도 $K_{\text{eff}}=0.57$ 정도였으며, 충분한 임계 안전성이 확보된다는 것을 확인하였다.

전해정련조의 주요 재료는 ANL-FCF에서 사용실적이 있는 내식성 Cr-Mo강재 또는 대등한 재료를 사용한다. 이와 같은 재질은 용융염 및 Cd와의 화학반응에 의한 부식은 거의 무시할 수 있다.

전해정제조의 운전 온도는 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ar 셀의 운전 압력은 약간 정압으로 설계하였다. 운전온도는 LiCl-KCl의 용융온도 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로, NaCl 등 혼입에 의한 온도상승을 고려하여 설정하였다. 밀봉성의 관점에서는 부압운전이 예상되지만 셀 등에서 분위기 Ar 가스 누설로 인해 산소 등의 불순물이 유입된 경우, UO_2 등의 불용해 산화물이 생성할 가능성이 있으므로, 이것을 방지하기 위해서 전해조 내에 고순도 Ar 가스를 유입시켜 약간 정압으로 운전한다. 전해정련조의 기상부에서 배출되는 고순도 Ar 가스의 산소, 수분, 질소농도는 과거 ANL 등의 실적을 참고하여 10 ppm 이하로 관리한다.

전해정련조는 5기로 1기 당 8개의 전극(U 및 TRU 회수 운전 시 : 양극 바스켓 4개, 고체음극 3개, 액체 Cd음극 1개, Zr회수 운전 시 : 고체음극 8개)을 가지도록 설계하였다. 양극 바스켓은 스테인레스, 고체음극은 철제 봉으로 하였다. 액체 Cd 음극은 BeO 도가니에 31 kg의 Cd를 장전하는 것으로 설계하였다.

U 및 TRU 회수운전 시는 그림 3.10에 나타난 것과 같이 양극 바스켓-고체음극, 양극바스켓-액체 Cd 음극, 양극 바스켓-고체음극, 양극바스켓-고체음극으로 전극을 접속한다. 양극 바스켓-고체음극은 약 20시간 전해운전하여 10 kgHM/음극의 U 석출물을 회수하도록 설계하였다. 또한 양극바스켓-액체 Cd 음극은 약 20시간 전해운전하여 약 3 kgHM/음극의 U-TRU석출물을 회수할 수 있도록 설계하였다.

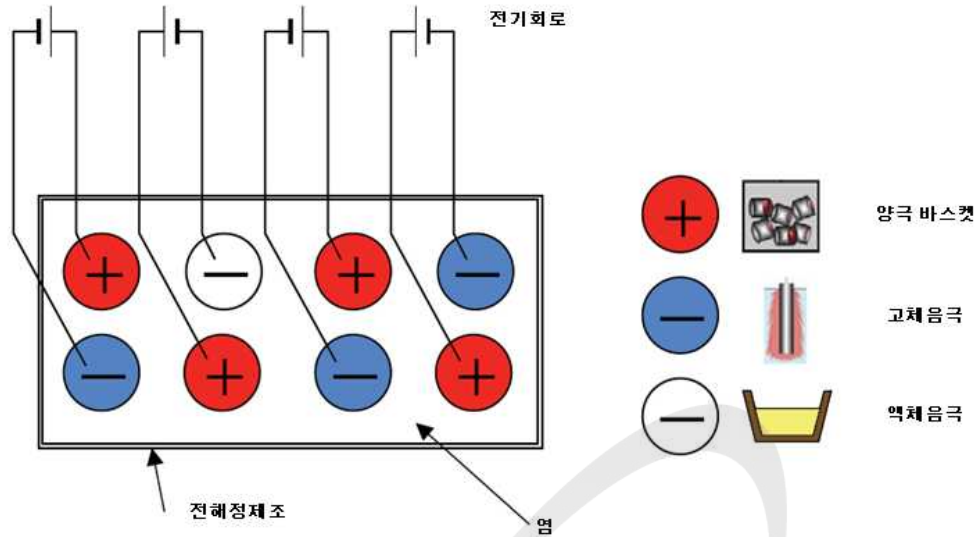


그림 3.10. 전해정련조 내 양극 바스켓과 음극의 배치와 전기회로.

U-TRU 회수운전은 전해정련조 내에 고체음극 3개와 액체 Cd 음극 1개를 장전하여 동시에 전해를 하기 때문에 전해염 속의 U 및 TRU 농도가 균일해야 된다. 전해정련조 내의 전해염을 pulsator 방식으로 Cd 풀을 교반하도록 설계했지만, 충분한 교반성능을 얻을 수 있는지에 관해서는 향후 실제 시험을 통해서 확인할 필요가 있다.

Zr 회수운전 시에는 전해조 하상의 Cd 풀을 양극으로 하여 전해염에 8개의 고체음극을 설치한다. 이 상태에서 전해를 실시하여 Cd 풀의 Zr을 고체음극으로 회수한다. 여기서는 고체음극 1개로 약 2.7 kg/음극의 Zr을 회수하도록 설정하였다. Zr 회수전해의 구체적인 운전조건 (전류 등)에 대해서는 공정의 운전상황(Cd 풀의 Zr 축적량, 전해염의 FP 축적량 등)과 전해염의 전해거동 (각 원소의 산화환원 전위 등)에 의존하며 향후 구체적인 검토가 필요하다.

전해정련조의 전해염은 FP 붕괴열에 의한 전해염 자체의 발열, Na 축적에 의한 융점상승, 제품으로 FP 혼입률 등의 관점에서 FP 등의 축적량에 제한을 받는다. 자연방열조건으로 전해정련조의 표면온도를 200 °C 정도 이하로 유지하기 위해서는 전해염의 FP 등으로 발열량을 31 kW/기 이하로 유지할 필요가 있다. 또한 전해염의 Na 축적에 의해 융점상승을

피하기 위해서 NaCl 농도를 10 mol% 이하로 제한할 필요가 있다. 이러한 제한 하에 U-TRU-Zr 잉곳에 U, Zr 등을 첨가하여 Pu 부화도를 조정하는 신연료의 FP 농도는 0.3 wt% 이하로 요구된다. 앞에서 언급한 요건을 만족시키기 위해서 전해정련조 내의 전해염을 적당히 방출하여 염처리 한 후 FP 등을 분리하여 전해염의 FP 농도를 7.4 wt%이하, NaCl 농도를 10 wt% 이하로 한다. 그리고 FP 농도의 상승값은 전해정련공정의 분리계수에 제약을 받는다.

(나) 음극처리장치

음극처리장치는 ANL-FCF에서 실적이 있는 회분식에서 처리능력 향상이 기대되는 연속식으로 설계하였다. 연속식에서는 고체음극처리장치 3기가 1기로, Cd 음극처리장치가 5기에서 1기로 감소가 가능하다. 고체음극처리장치 및 Cd 음극처리장치의 외형도는 그림 3.11과 그림 3.12에 각각 나타냈다. 고체음극처리장치의 크기는 8 m×5 m×3 mH 정도이며, Cd음극처리장치의 크기는 9 m×6 m×3 mH 정도이다. 주요 재료로는 고 내식성을 가지는 비Ni 스테인레스강 또는 대등한 재료를 사용한다.

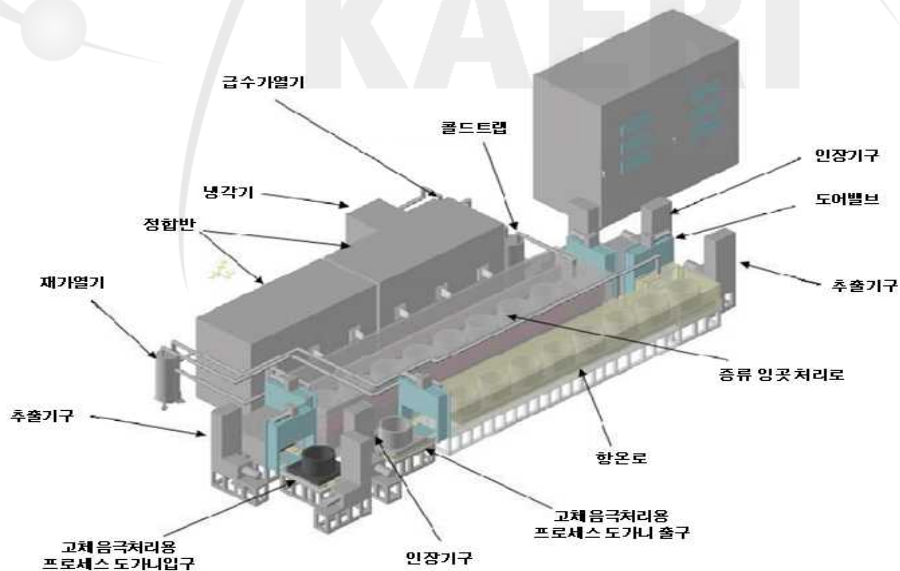


그림 3.11. 고체음극처리장치 외형도.

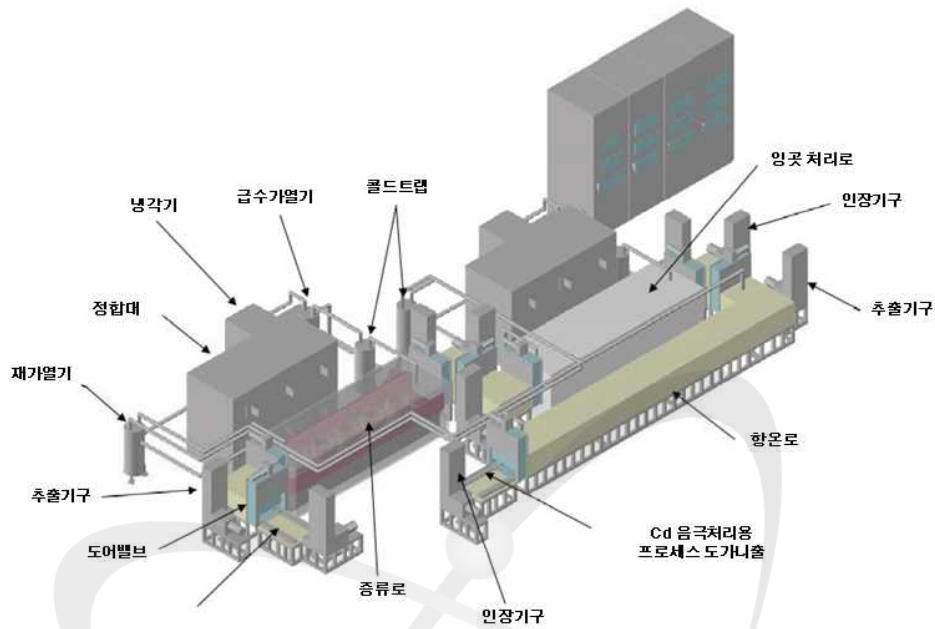


그림 3.12. Cd음극 처리장치 외형도.

고체음극처리장치는 증류/잉곳 처리로와 항온로로 구성되어 약 50 Torr의 Ar기류에 의해 연속적으로 염증류물을 이송하여 콜드트랩으로 회수하는 구조로 되어 있다. 증류/잉곳 처리로는 2단계로 온도설정이 되어 있고 1,000 °C의 운전온도로 고체음극석출물의 부착염을 증류 제거하고, 1,400 °C의 운전온도로 고체음극석출물을 용융 처리하여 U-Zr 잉곳을 제조한다. 전해정련조에서 이송되는 U 석출물(약 10 kg의 U 수지상결정에 약 2 kg의 전해염부착 가정)은 15 개/d이며, 고체음극처리용 프로세스 도가니 1 개에 2 개의 U 석출물을 장전한다. 고체음극처리장치는 증류~잉곳 처리가 약 9 시간, 항온처리가 약 15 시간으로 운전되어 고체음극처리 프로세스 도가니를 8 개/d의 속도로 처리하는 능력을 가진다.

Cd음극 처리장치는 증류로, 잉곳 처리로, 항온로로 구성되며 약 100 Torr의 Ar 기류에 의해 연속적으로 Cd 증류물을 이송하여 콜드트랩으로 회수하는 구조로 되어있다. 증류로는 700 °C의 운전온도로 U-TRU 석출물의 금속 Cd를 증류 제거하여 잉곳 처리로는 1,150 °C의 운전온도로 합금 Cd를 증류 제거함과 동시에 용융처리하여 U-TRU-Zr 잉곳을 제조한

다. 전해정련조에서 이송되는 U-TRU석출물 (31 kgCd에 약 2.9 kgHM이 용융)은 10개/d이며, Cd 음극처리용 프로세스 도가니에 1개의 U-TRU 석출물을 넣는다. Cd음극 처리장치는 증류 처리가 약 10시간, 잉곳 처리가 약 8시간, 항온처리가 약 6시간으로 운전되며 Cd음극처리용 프로세스 도가니를 10 개/d의 속도로 처리하는 능력을 가진다.

음극처리장치의 가열로는 유도코일 가열을 기본으로 한다. 항온로는 회분식 음극처리장치의 자연냉각방식 (약 12 시간 이상)에서 Ar기류로 강제냉각방식으로 변경하여 냉각시간을 대폭 단축하였다. 음극석출물을 장전하여 잉곳제조 음극처리용 프로세스 도가니는 graphite 재로 되어 있지만 보호를 목적으로 표면에 ZrO_2 를 코팅한다. 또한 잉곳 취출 후에 코팅재와 HM이 반응하여 생성되는 드로스는 긁어낸 후, 처리공정으로 이송하여 HM 성분을 처리한다.

(다) Cd 증류 장치

전해정련조의 Cd풀에서 Cd을 정기적으로 빼내 NM 등의 FP를 분리하는 처리를 실시한다. 이 처리는 25일에 1회 빈도로 실시하며 5개의 전해정련조에 대해 사용빈도는 5일에 1회 정도가 된다. 이 때문에 Cd 증류 장치의 기수는 1기로 한다. 본 장치는 800 °C의 온도로 Cd를 증류하는 것으로 NM 및 Zr 등을 분리한다. 장치의 크기는 4 m×2 m×3 mH 정도이며, 주요 재료는 내식성을 가지는 비Ni 스테인레스강 또는 동등한 재료로 한다. 1회의 Cd 처리량은 전해정련조에 저장한 Cd 풀의 80 % (Cd 중량 : 1,120 kg)이다.

(4) 염처리시설

(가) TRU 환원추출기

TRU 환원추출기는 전해정련조에서 정기적으로 빼낸 전해염을 인수하여 환원제를 첨가한 Cd상과 향류 접촉시켜 U 및 TRU를 Cd상에 환원추출하는 장치이다. 추출된 U-TRU를 포함한 Cd은 재산화조로 이송하여

U-TRU의 대부분을 회수한 후 전해염을 제올라이트 칼럼으로 이송한다. 각 전해정련조에서 6일에 1회 빈도로 전해염의 약 3.5 % 즉 약 121 kg(약 67 L)를 빼내서 처리한다. TRU 환원추출기의 외형도는 그림 3.13에 나타났다. 본 장치는 향류식 6단 조합을 1기로 하였다. 이 장치로 운전온도 500 °C에서 U-TRU 포함 전해염과 Li-K 환원제를 포함 Cd상을 향류 접촉시킨다.

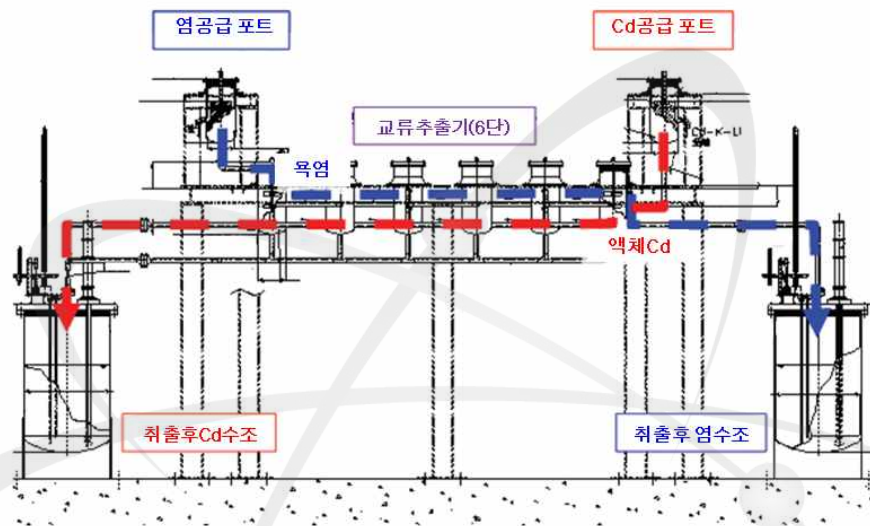


그림 3.13. 환원추출기의 외형도.

(나) 제올라이트 칼럼

제올라이트 칼럼은 길이 61 cm, 내경 20 cm의 원통형 칼럼에 Li 교환 제올라이트(LiCl-KCl에 제올라이트 4A를 넣어 Na와 Li-K를 교환한 것)를 충전율 50 vol%로 충전한 것이다. TRU 환원 추출기에서 U-TRU를 제거한 전해염에 포함되는 알칼리 금속, 알칼리 토류, 희토류 등의 FP는 이온 교환 반응 또는 흡착 반응으로 제올라이트 흡착된다. 제올라이트 칼럼의 운전온도는 500 °C이며, TRU 환원추출제염 56 L를 약 1일에 처리하는 능력을 가진다.

(다) 재산화조

재산화조는 TRU 환원추출기에서 이송된 Cd과 제올라이트 칼럼에서 이송된 전해염을 인수한다. 산화제로 CdCl_2 를 첨가하여 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 의 운전온도로 반응시켜, Cd에 포함된 U 및 TRU를 염화물로서 전해염으로 전환하여 전해정련조로 이송한다. 재산화조의 용량은 TRU 추출기 1배치 분량과 동일하다. 산화제로 이용되는 CdCl_2 는 재산화조에서 Cd(6.2 kg)과 Cl_2 가스(3.9 kg)와 반응시켜 제조한다.

(5) 드로스 처리 시설

음극처리장치와 사출성형장치(연료주조)에서 발생하는 HM 산화물이 주성분인 드로스는 음극처리장치로 회수되는 전해염과 같이 드로스 염화조로 이송된다. 드로스 염화조는 1기로 되어 있으며, ZrCl_4 및 금속 Zr을 첨가하여 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도로 반응시키면 HM 산화물은 HM 염화물이 된다.

HM 염화물은 음극처리장치에서 인수한 전해염과 함께 전해정련조로 돌려보내 진다. 이때 전해염 속에는 반응 부산물로 ZrO_2 가 발생하기 때문에 이것을 필터로 분리한 후 TRU 폐기물(드로스 폐기물)로 폐기한다.

(6) 오프가스 처리설비

핀 진단장치, 전해정련조, 고체음극 처리장치 등의 주요기기는 오프가스를 처리하기 위해 HEPA 필터, Cs/Ru 흡착탑, 트리튬 제거장치, 요오드 흡착탑(AgS) 등으로 구성되는 오프가스 처리시설을 설치하였다. 장치 내부압유지에 관련한 안전계기와 오프가스 처리설비는 이중 시스템으로 설치하고, 정화된 오프가스는 배기관에서 방출된다.

(7) 폐기물처리·저장설비

건식처리 프로세스에서 발생하는 폐기물은 인공광물 고화설비, 고방사성 및 저방사성 고체폐기물 처리설비, 중방사성 및 저 방사성 폐액 처리설

비로 처리한다.

제올라이트 칼럼에서 발생하는 FP 흡착 제올라이트 및 부착염 등 폐기전해염은 인공광물고화설비로 처리한다. FP 흡착 제올라이트 및 부착전해염 등 폐기전해염에는 건조 제올라이트, 산화 처리한 페Na 본드와 페몰드(연료제조공정에서 발생) 등을 첨가하여 Heat Mixer로 열 혼합한다. Pressureless Consolidation(PC) 방식의 인공광물고화장치로 고온으로 가압하여 인공광물 고화체(유리결합 소다라이트)를 제조한다. Phase I에서는 Hot Isostatic Pressing (HIP) 고화방식의 인공광물고화장치를 적용하여 850 °C에서 2×10^8 N/m²의 고압으로 약 4시간 작업하도록 설계되었으나, Phase II에서는 ANL이 셀 내 사용을 고려해서 개발한 간이방식인 PC방식을 적용하였다, 이 방식은 약 900 °C에서 정압으로 16시간 처리한다. 인공광물 고화체는 고준위폐기물로 분류된다.

고방사성폐기물 처리설비는 압축장치, 시멘트 유리고화 장치, 통 압축장치, 표면오염검사 장치 등으로 구성된다. 압축장치는 hull, 스페이서 와이어 등의 프로세스 폐기물을 감용하기 위한 설비로서 1기를 설치한다. 시멘트 고화장치는 전단 플레넘, NM 폐기물, 드로스 폐기물, 집합체부재 등의 폐기물을 압축처리 후 시멘트 유리를 투입하여 고화하는 설비로서 1기를 설치한다. 또한 이 시멘트 고화장치에는 중방사성 폐액처리설비에서 발생하는 농축액을 혼입시킨다. 여기서 처리되는 폐기물 중에서 집합체 부재는 고βγ고체폐기물로 분류하여 타 TRU 폐기물과 구분한다.

저방사성 폐기물처리설비는 유동상 소각로, 고주파 용융로, 시멘트 유리고화 장치, 드럼 캐핑설비, 표면오염검사 장치 등으로 구성된다. 유동상 소각로는 음극처리용 프로세스 도가니, 사출성형도가니(연료제조공정), 가연성 저방사성 고체폐기물 등의 프로세스 폐기물을 소각처리하기 위한 설비로서 1기가 설치된다. 이러한 폐기물은 소각재로 남기 때문에 크게 감용된다. 고주파용융로는 사용후필터, 금속 등 불연성의 저방사성 고체폐기물을 용융처리하여 감용하는 설비로서 1기가 설치된다. 시멘트 유리고화 장치는 용융처리 한 폐기물에 소각재를 투입하여 시멘트 유리로 고화하는 장치로서 1기가 설치된다. 여기서 처리된 폐기물은 저준위폐기물로 분류된

다.

중방사성 폐액처리설비는 중방사성 폐액저장조, 중방사성 폐액 증발장치, 중성자성 분석 폐액 저장조, 탈초장치 등으로 구성된다. 중성자성폐액으로는 주로 주공정의 기기 제염수를 고려하고 있으며 설비용량은 연 1회 전해저장조를 제염하는데 필요한 양을 반영한다. 이러한 폐액은 임시저장조 (1기)에 축적 후에 증발장치 (1기)로 농축하여 고방사성폐기물 처리설비로 운반하여 시멘트 고화한다. 중방사성 분석 폐액저장조 (1기) 및 탈초장치 (1기)는 주공정의 분석에서 발생하는 분석폐액을 처리한다. 분석폐액은 임시저장조에 축적하여 탈초처리 후 드로스 염화조에서 빼내 드로스 처리를 거쳐 주 공정장치에서 리사이클한다.

저방사성 폐액처리시설은 저방사성 폐액저장조 (1기), 저방사성 폐액증발장치 (1기)로 구성된다. 저방사성 폐액으로는 주로 저방사성 분석폐액이 있다. 이 폐액은 임시저장조에 축적 후에 증발장치로 농축하여 농축액은 중방사성 폐액저장조로 운송한다.

폐액저장시설은 건식처리 연료제조시설에서 발생하는 폐기물고화체를 1년 보관한다고 가정한다. 인공광물 고화체 저장시설은 공기냉각장치가 부착된 캐니스터 저장창고로, 160개의 인공광물 고화체 캐니스터(150 L)를 수납할 수 있다. 고방사성 고체폐기물 저장시설은 TRU 폐기물 및 고 $\beta\gamma$ 폐기물 200드럼(200 L)을 수납할 수 있다. 저방사성 고체폐기물 저장시설은 저준위폐기물 250드럼(200 L) 수납할 수 있다. 이러한 폐기물은 1년 보관 후에 폐기물처리장으로 반출한다고 가정하였다.

(8) 분석시설

분석시설은 전처리시설, 전해처리시설, 연료제조시설 등에서 샘플링 한 시료를 분석하는 시설이다. 각 설비에서의 주요 분석개소, 샘플링 대상(목적)은 다음과 같다.

① 전처리시설의 분석개소

- 전단기에서의 사용후핵연료 전단편 (계량관리용)

② 건식처리시설의 분석개소

- 전해정련조에서의 전해염 및 Cd (운전제어/계량관리용)
- 고체음극처리시설에서의 U-Zr잉곳 (품질관리용/계량관리용)
- Cd음극 처리장치에서의 U-TRU-Zr잉곳 (품질관리용/계량관리용)

③ 연료제조시설의 분석개소

- 사출성형장치에서의 연료슬래그 (품질관리용/계량관리용)

각 샘플에서 계량관리를 목적으로 한 시료는 주로 U, Pu량 및 동위원소조성을, 운전제어는 U, Pu, MA량 및 동위원소조성을, 품질관리는 U, Pu량 및 동위체 조성과 Zr, 불순물의 혼합 장전량을 각각 분석한다. 본 설비는 이러한 샘플의 분석을 위해 분석 장치를 갖추는 것과 동시에 분석의 전처리용 용해장치, 불순물 분리장치, 열분해장치 등을 갖춘다. 또한 여기서 발생하는 분석폐액을 임시 저장하는 저장조를 설치한다. 1샘플 1분석을 기본으로 분석빈도 등을 고려하여 분석 장치의 대수를 정하였다. 그 결과 전위차 측정기 2대, 전량기(coulometer) 2대, 질량분석기 2대, k-edge+형광 X선 분석기 2대, α스펙트럼미터 3대, γ스펙트럼미터 3대, ICP-AES 분석기 3대, 이온 크로마토그래피 2대, 산소·질소·탄소(O-C-N) 시스템 2대로 정하였다. 향후 샘플링의 대표성이나 적절한 샘플링·분석횟수에 대해 검토할 필요가 있다.

(9) Ar 셀 내 가스냉각·정화설비

Ar 셀 내 가스냉각·정화설비는 Ar 셀 내의 분위기 가스를 인출해서 HEPA 필터로 미세한 먼지 등을 제거한 후, 냉각기 (약 225,000 m³/h×약 1300 kW×2기)로 냉각과 동시에 산소제거(약 5,000 m³/h×1기), 수분제거 (약 500 m³/h×1기), 질소제거(약 1,600 m³/h×1기) 등을 수행하는 정화장치로 불순물을 제거하여 Ar 셀 내으로 돌려보내는 설비이다. 일반적인 가스 정화방식은 흡착제방식, 막분리방식, 용매방식, 저온정제방식을 들 수 있

고, ANL의 시험설비 (FCF)에서는 용매방식이 적용되었지만 본 검토에서는 적용용량이 전해처리시설을 대상으로 하기 때문에 일반 공업에서 산소, 질소 등을 대규모로 정제 처리한 실적이 있는 흡착제방식의 하나인 PSA 방식을 적용하였다. 이 설비로 셀 내의 조명기구, 프로세스기기 등에서 발생하는 열을 제거하여 셀 내의 분위기온도를 적정온도로 유지하는 것과 동시에 분위기가스의 산소, 수분, 질소 농도를 ANL 등에서의 과거 실적 값에 근거하여 각각 50 ppm(최대 100 ppm), 50 ppm(최대 100 ppm), 500 ppm(최대 1,000 ppm) 이하로 관리한다. Ar공급설비는 고순도 Ar 가스를 사용하는 프로세스 기기, 에어록 셀 등에 Ar 가스를 공급하는 것과 동시에 Ar 셀 내 압력 저하 시, Ar 가스를 긴급공급 하는 역할을 담당한다. 진공배기 설비는 Ar 셀 압력상승 시 또는 에어록 셀 개폐 시 등에 가스 배기를 실시한다.

(10) 냉각수 설비·냉수설비

냉각수 설비는 밀폐식 냉각탑 유닛 (약 1.5×10^6 kcal/h \times 2기)으로 냉각수를 제조하여 프로세스 기기 등에 냉각수를 공급하는 설비이다. 안전관련 장치는 이중 시스템, 일반기계는 단일 시스템으로 설계한다. 또한 이상 발생 시에는 일반기계를 격리할 수 있도록 설계되어 있다.

냉수설비는 냉동기 (약 1.35×10^6 kcal/h \times 2기)로 냉수를 제조하며 프로세스 기기 등에 냉수를 공급하는 시설이다. 여기서도 안전관련 장치와 동적기기는 이중 시스템, 일반기계는 단일 시스템으로 설계한다. 또한 이상 발생 시에는 일반기계를 격리할 수 있도록 구성으로 되어 있다.

6. 시설설계

가. 계량관리와 셀 구분

물질수지구역(Material Balance Area : MBA)을 MBA-1, MBA-2, MBA-3으로 나뉘 핵물질을 적절히 밀봉관리 할 수 있도록 설계하였다. 주요 측정점(Key Measurement Point : KMP)에서의 계량은 화학분석, 중

량측정, 비파괴측정의 조합으로 실시한다. KMP를 포함한 MBA 계획도는 그림 3.14에 나타났다. 반입량 계량관리방법 (그림 3.14의 ②부분)으로는 다양한 안이 있지만 여기서는 ANL의 FCF에서 적용하고 있는 방식인 편단편을 대표 샘플링으로 채취·분석하여 연소계산결과를 보증하는 방식을 적용하였다.

또한 반출량 계량관리(그림 3.14의 ③부분)는 사출성형 슬래그의 조각을 샘플로 한 분석결과와 중량측정결과를 조합하는 방법을 적용하였다.

적시성의 요구에 대해서 NRTA 등의 대응책의 검토가 실시되고 있지 않기 때문에 향후 과제로 남아 있다.

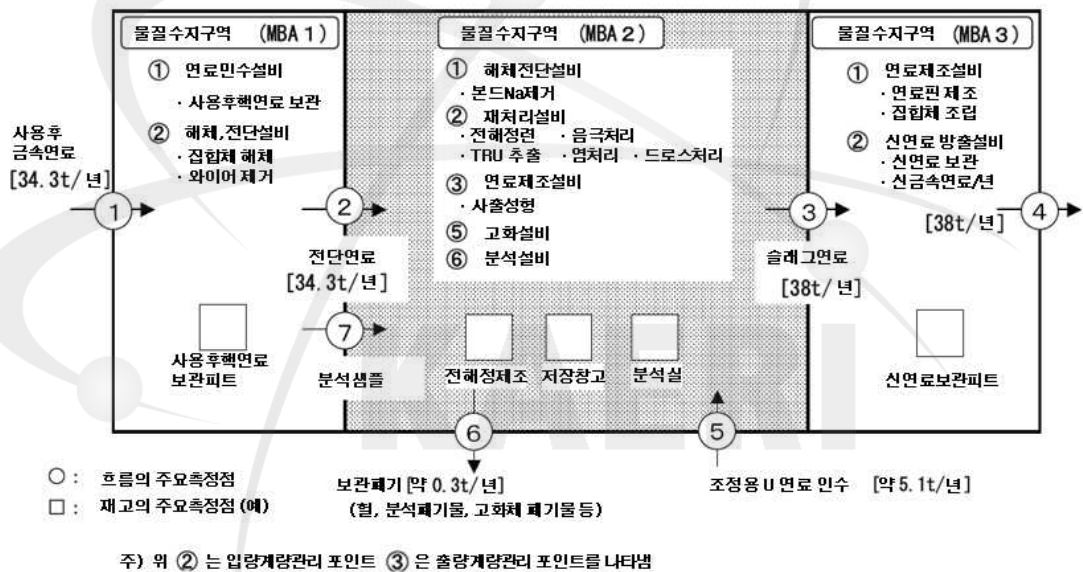


그림 3.14. 금속연료 리사이클 시설의 물질수지구역(MBA).

나. 셀 내 기기배치

금속핵연료를 직접 취급하는 셀은 화재방지대책 등을 목적으로 Ar 셀로 부압으로 관리한다. Ar 셀 내에는 정화장치를 설치하여 분위기 가스 중의 불순물농도를 산소 100 ppm, 수분 100 ppm, 질소 1,000 ppm 이하로 제한한다. 또한 셀 내의 프로세스 기기 등에서 방출되는 열로 인한 온도상승을 억제하기 위해 셀 밖에 냉각설비를 설치하고 Ar 순환가스를 냉각하

여 셀 내 분위기온도를 40 °C정도로 유지한다.

건식처리시설의 주건물의 Ar 가스 용적은 표 3.6에 나타낸 바와 같이 연료인수·전처리 셀 2,500 m³, 전해분리 셀 10,000 m³, TRU 추출/염처리 셀 2,500 m³이며 기타 부분을 포함해 합계 약 20,000 m³이 된다.

셀 내의 기기 배치도는 그림 3.15에 나타냈다. 3층에 배치한 연료인수·전처리 셀에서는 연료저장시설에서 입수한 사용후핵연료 집합체를 임시 보관하다가 필요에 따라 집합체 해체기, 핀 전단기로 전단편으로 만들어 전해분리셀에 설치한 턴테이블의 양극 바스켓에 장전한다. 전해분리셀은 전단편을 장전한 양극바스켓을 Na 본드 제거장치로 이송하여 Na 본드를 제거한다. 양극 바스켓을 전해정련조에 설치하여 전해저장조에서 전해분리처리한다. 전해저장조에서 꺼낸 U 석출물과 U-TRU 석출물은 고체음극처리장치와 Cd음극 처리장치로 염 및 Cd를 제거하여 각각 U-Zr 잉곳, U-TRU-Zr 잉곳으로 회수한다. 회수한 잉곳은 임시보관한 후 연료제조셀로 보낸다. 음극처리장치를 연속식으로 설계하였기 때문에 회분식보다 기기의 높이를 낮출 수 있었고 이로 인해 전해분리 셀의 층높이를 낮게 할 수 있다. 또한 전해분리 셀에는 양극 바스켓, 양극 및 음극 어셈블리, 고체 및 Cd음극처리용 프로세스 도가니 등의 이송·장전에 사용하는 자동장치를 위한 레일을 셀 내에 설치한다. TRU 추출·염처리 셀은 2층에 배치하고, 전해분리셀의 전해정련조에서 정기적으로 이송되는 전해염 등을 TRU 추출기, 제올라이트 칼럼기 등으로 처리한다.

연료인수·전처리 셀의 사용후핵연료 집합체 임시보관 피트는 사용후핵연료 저장시설에서의 연료집합체의 보급을 고려하여 1주일 분량을 보관할 수 있는 버퍼용량으로 한다. 또한 전해분리 셀 내의 주요기기 간에는 그림 3.16에 나타난 것과 같이 양극 바스켓 작업대, 양극 어셈블리 작업대, 고체 및 Cd음극 작업대, 음극처리용 프로세스 도가니 저장창고, 잉곳저장창고 등의 버퍼를 설치했다. 이러한 버퍼는 후속 공정기기의 1배치 처리분량 (1일 또는 0.5일 분 정도)에 비상용을 추가한 용량이다.

또한 전처리 셀의 전단기 등의 기기나 전해분리 셀의 전해정련조 등 주요 기기를 유지·보수할 수 있도록 유지보수 셀을 설치한다.

표 3.6. 38tHM/yr 용량 금속연료 리사이클 시설의 셀용량

셀명		용적(m ³)	
Ar 셀	전처리셀	2,500	20,300
	전해 분리셀	10,000	
	염처리셀	2,500	
	사출 성형셀	4,900	
	기타	400	
공기셀	연료불출/연료집합체셀	4,000	12,200
	인공광물고화셀	1,000	
	고방사성 폐기물 처리셀	1,600	
	보수셀	1,900	
	에어록셀(치환)	2,100	
	기타	900	
합 계		32,500	

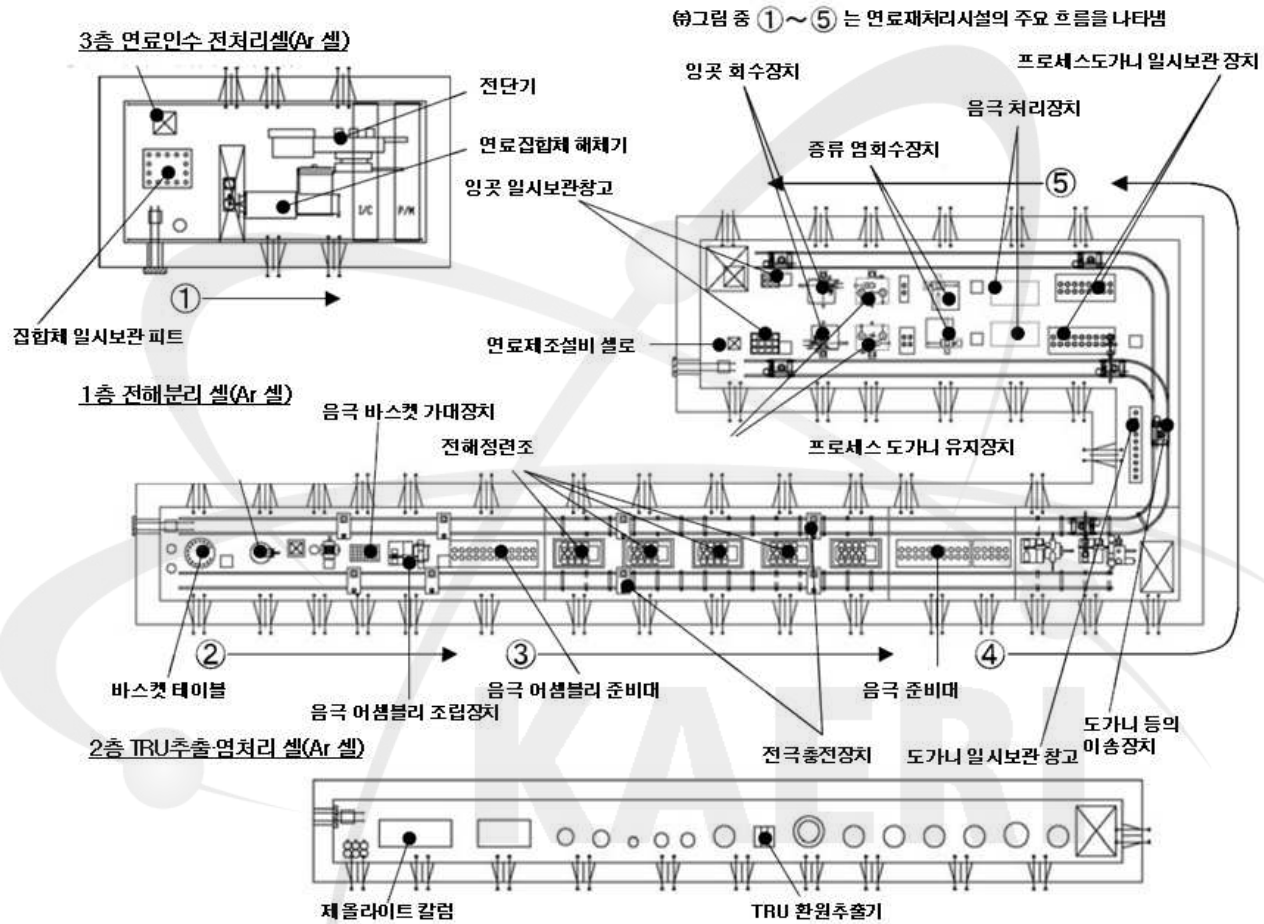


그림 3.15. 처리시설 셀 내의 주요기기 배치도.

4일 사이클
 액체, 전단 : 노심연료 2일+2/3일+블랑켓 2/3일+2/3일
 본드 제거 : (노심2+경블랑켓+플레넘1배치) × 1일

25일 사이클
 노심연료 : (음극4(노심연료3+블랑켓1)+고체음극3+Cd음극×2배치)×4일+(염처리)×6일
 + (Zr음극8)×1일 + Cd플 받출 80%

6+2/3일 사이클
 내측 노심 4집합체+외측 노심2집합체+블랑켓 약1집합체

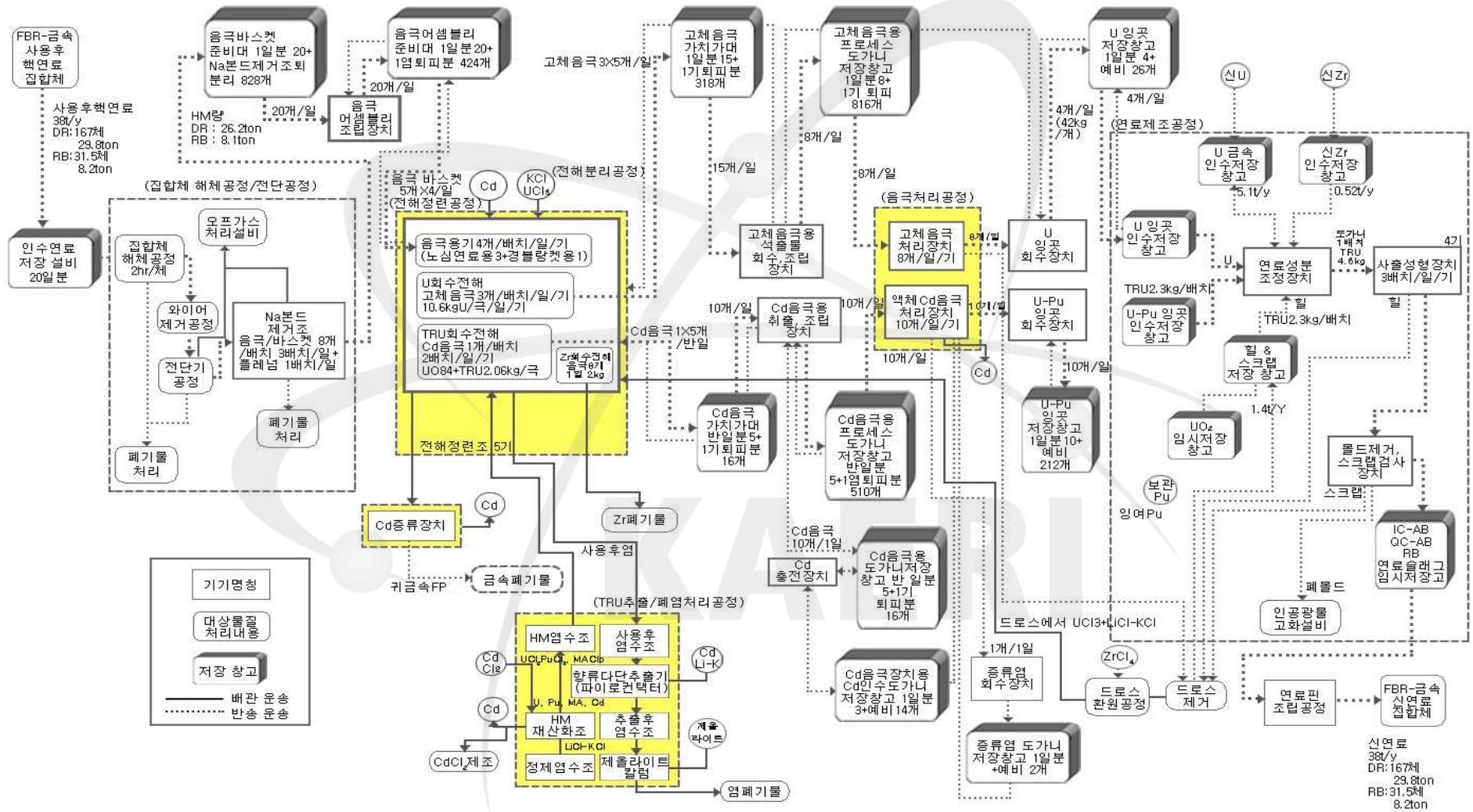


그림 3.16. 주요 기간간 작업대, 임시보관 창고 등의 용량설정.

다. 공급시약 · 유틸리티

금속전해 처리시설에서 필요한 시약 · 유틸리티로는 LiCl-KCl, Cd, 금속 Li, 금속 K, graphite 도가니, 제올라이트, 가스, 전기 등을 들 수 있다. 이러한 시약 · 유틸리티의 사용량을 정리하여 표 3.7에 나타냈으며, 사용목적은 아래에 기술한다.

표 3.7. 주요 공급시약, 유틸리티의 소요량

주요 공급시약, 유틸리티	주요 사용목적	사용량
LiCl-KCl	전해정련조의 전해염 보충	83 kg/yr
금속Li	TRU환원추출기에 환원제로 공급	50 kg/yr
금속K	TRU환원추출기에 환원제로 공급	570 kg/yr
음극처리용 프로세스 도가니	음극처리장치에 소모품으로 공급	18.2 t/yr
사출성형용	사출성형장치에 소모품으로 공급	3.9 t/yr
교환 제올라이트	제올라이트칼럼에 FP흡착제로 공급	3.9 t/yr
건조 제올라이트	인공광물 고화체설비에 염화물 고화제로 공급	21.5 t/yr
액체 Ar	기기 내 Ar 오프가스 공급, Ar 셀 내에 공급	510 t/yr
전기	주요기기 가열, 셀 내 조명기구 등 (연료제조설비 포함)	9,300 kW

(1) LiCl-KCl

LiCl-KCl은 5기의 전해정련조로 사용된다. 전해정련조의 LiCl-KCl 적재량은 약 2,380 kg/기이다. 전해정련조의 전해염의 일부는 정기적으로 빼내서 FP제거처리를 실시함과 동시에 전해염 중의 NaCl농도를 낮추기 위해 전해염의 일부도 제올라이트에 흡착시켜 폐기한다. 환원제로 투입하는 Li 및 K의 염소화, Li교환 제올라이트에서의 LiCl이행에 있어서도 LiCl-KCl은 증가하지만, 부족분은 추가 공급할 필요가 있다. 보충용 LiCl-KCl의 연간사용량은 약 83 kg가 된다.

(2) Cd

Cd는 전해정련조의 Cd 풀의 약 1,400 kg/기 저장되는 것 외에 액체 Cd 음극, 염처리시설에서 사용된다. 다만 사용후 Cd는 Cd 증류 장치 등으로 증류 처리하여 원칙적으로 전부 재사용한다.

(3) 금속 Li-K

TRU 환원추출기에서 환원제로 Cd에 투입하여 사용한다. 연간사용량은 금속 Li 약 50 kg, 금속 K 약 570 kg 이다.

(4) Graphite 도가니

고체음극 및 Cd음극처리장치, 사출성형장치 (연료제조시설)에서 사용되며 20회를 사용한 후 교환하는 소모품이다. 고체음극처리용 프로세스 도가니, Cd음극용 처리, 사출성형 도가니의 연간사용량은 각각 144, 192, 213개 (노심연료 슬래그용 149개+블라켓 연료 슬래그용 64개)이며, 중량으로는 약 18.2 t (연료 제조 시설분을 포함 약 22.1 t)에 해당한다.

(5) 제올라이트

제올라이트 칼럼에 충전하는 Li교환 제올라이트 및 인공광물 고화체 제조 시에 첨가하는 건조 제올라이트로 사용된다. Li교환 제올라이트 및 건조 제올라이트의 연간사용량은 각각 약 3.9 t 및 21.5 t이며, 합계 약 25.4 t이다.

(6) Ar 가스

전처리 셀이나 전해분리 셀 등은 화재방지를 위해 Ar 셀로 Ar 가스를 순환시켜 산소, 수분, 질소농도를 관리한다. 에어록 개폐로 인한 Ar 소비, Ar 셀 내 압력저하 시의 Ar 가스 보충량, 전해정련조로의 고순도 Ar 가스의 공급량 등을 합해 연간 Ar 가스 사용량은 약 510 t/yr가 된다.

(7) Cl₂ 가스

재산화조에서 이용하는 산화제 CdCl₂의 제조에 사용된다. Cl₂ 가스의 사용량은 연간 약 750 kg이다.

(8) 전기

전해정련조, 음극처리장치 등의 가열설비나 전기계장설비, 조명설비 등에 대한 필요전력량을 약 9,300 kW로 산출되었다. 이외에 플랜트 설계로는 연료유, 용수, 냉각수, 냉수, 증기, 압축공기 등의 유틸리티도 소요된다.

라. 시설개요

38 tHM/yr 용량의 금속전해 리사이클 시설의 전체 배치도는 그림 3.17에 각 건물의 체적을 표 3.8에 나타냈다. 금속전해법 리사이클 시설의 주 건물 (전해처리시설, 연료제조시설, 폐기물처리·저장시설, 분석시설, 유틸리티 설비, 중앙제어실 등)과 연료저장건물 (사용후핵연료 저장설비, 신연료 저장설비)의 배치도는 그림 3.18에 나타냈다. 또한 주 건물 각 층의 배치도는 그림 3.19~그림 3.26에 나타냈다. 본 시설에서는 폐기물처리·저장시설, 오프가스 처리시설, Ar 셀 내 가스냉각·정화설비, 분석설비, 냉각수 설비, 냉수설비, 중앙제어실, 비상용 발전기, 방사선 관리동, 배기관 등은 전해처리와 연료제조에서 공용으로 사용한다.

본 시설에서는 우선적으로 사용후핵연료를 지상 1층의 트럭 야드에 반입하여 지상 3층의 연료인수·전처리 (해체·전단 설비)셀로 이송한다. 여기서 연료의 분위기를 Ar로 치환한 후에 해체·전단 처리를 실시한다. 그 후 지상 1층의 전해분리 셀로 이송하여 전해정련·증류 등의 처리를 실시한 후 U, U-TRU 잉곳을 회수한다. 회수한 잉곳은 지하 1층의 연료제조셀 (사출성형설비 등)로 이송하여 사출성형 등의 처리를 통해 연료핀이 된다. 연료핀은 지상 1층의 연료제조셀 (연료집합체 조립설비 등)로 보내져 여기서 연료집합체를 제조한다. 전해정련조에서 염처리를 위해 배출되

는 전해염 (FP포함)은 2층의 TRU 추출/염처리 셀로 이송하여 TRU추출, 제올라이트 칼럼 처리로 FP를 분리하여 재산화를 거쳐 1층의 전해정련조로 돌려 보내진다. 분리한 FP를 포함한 제올라이트 칼럼은 지하 1단의 인공광물고화·저장시설로 이송되어 여기서 PC처리를 실시하여 소다라이트 고화체가 된다. 본 시설에서는 위와 같은 처리에 있어서 필요한 부대시설이 각 층에 설치되어 있다. 주요 부대시설의 배치는 아래와 같다.

· 1층

- 고방사성 고체폐기물 취급설비·처리설비
- 저방사성 고체폐기물 취급설비·처리설비

· 2층

- 건물 환기설비

· 3층

- 오프가스 처리설비, Ar 가스 정화냉각설비, 압축공기·가스 공급설비, 보수 셀

· 4층

- 중앙제어실, 전기설비, 냉각설비, 압축공기·가스 공급설비, 건물 환기설비

· 옥상

- 건물 환기설비, 순화·정화 설비, 냉각수·냉수제조설비

· 지하 1층

- CdCl₂제조설비, 고방사성 고체 폐기물 처리시설·저장설비
- 저방사성 고체 폐기물 처리설비, 저/중방사성 폐액 처리설비

표 3.8. 38 tHM/년 용량 금속연료 리사이클 시설의 각 건물 용적

건물종류	설비	용적(m ³)
건식처리/연료제조건물	연료수납/전처리시설 · 집합체 해체 · Na 분드 제거 건식처리시설 · 전해정련 · 음극처리 · 염처리 연료제조/연료 불출 설비 · 사출성형 · 연료핀 제조 · 연료 집합체 조립 공용설비 · 오프가스 처리설비 · 가스 정화 냉각설비 · 폐기물처리/저장설비 · 분석설비 · 보수설비 · 계장제어설비 · 중앙제어실 · 유틸리티 설비	외벽 : 210,000 (53 m×104 m×37 mH) 중심 : 170,000 (51 m×103 m×34 mH)
연료저장건물	사용후핵연료 저장설비 신연료 저장설비	외벽 : 90,000 (55 m×58 m×29 mH) 중심: 80,000 (53 m×56 m×26 mH)
기타(비상용 발전건물, 보일러건물, 건물연료용 저유조, 관리동, 배기탑 등)		

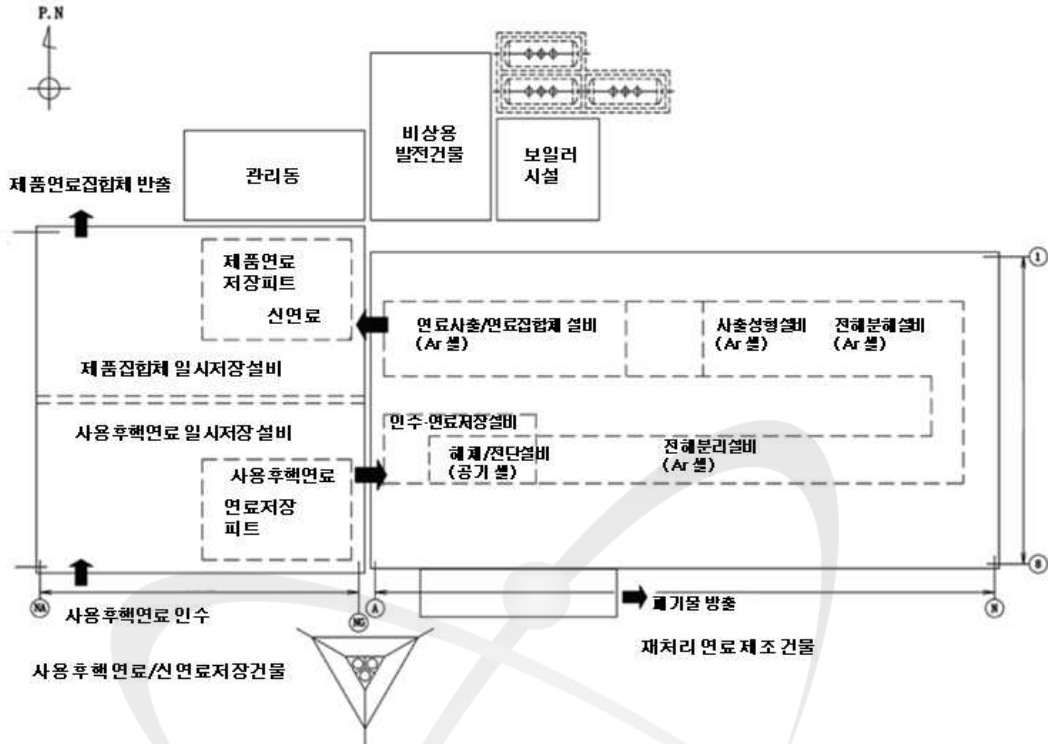


그림 3.17. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 전체 배치도 (38 tHM/yr).

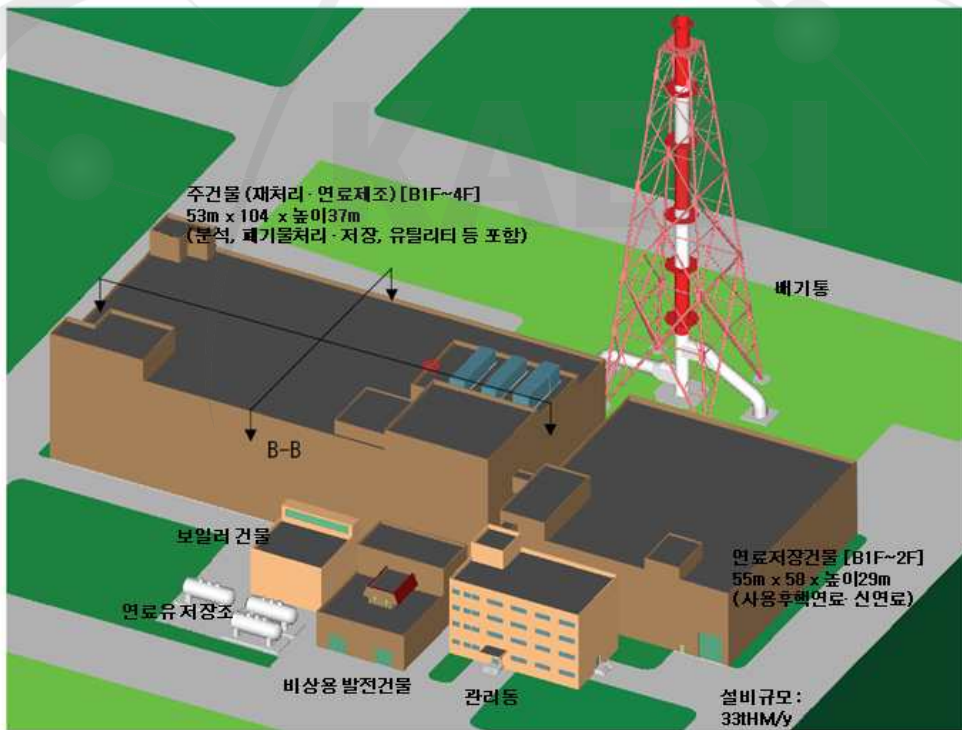


그림 3.18. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 전체 조감도 (38 tHM/yr).

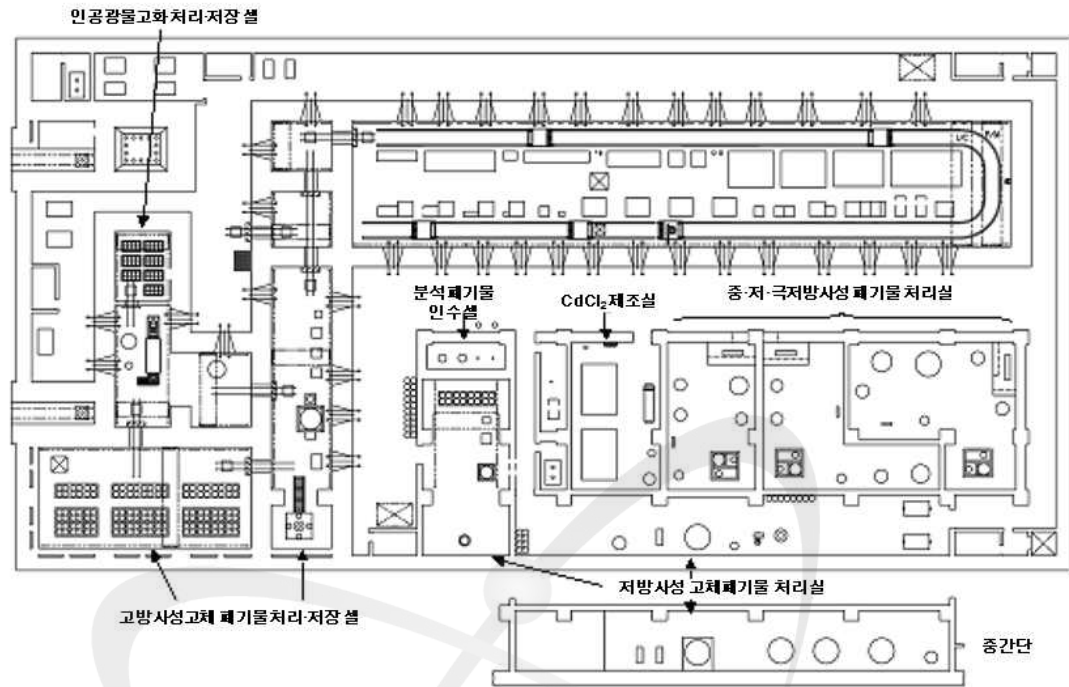


그림 3.19. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지하 1층 평면배치도 (38 tHM/yr).

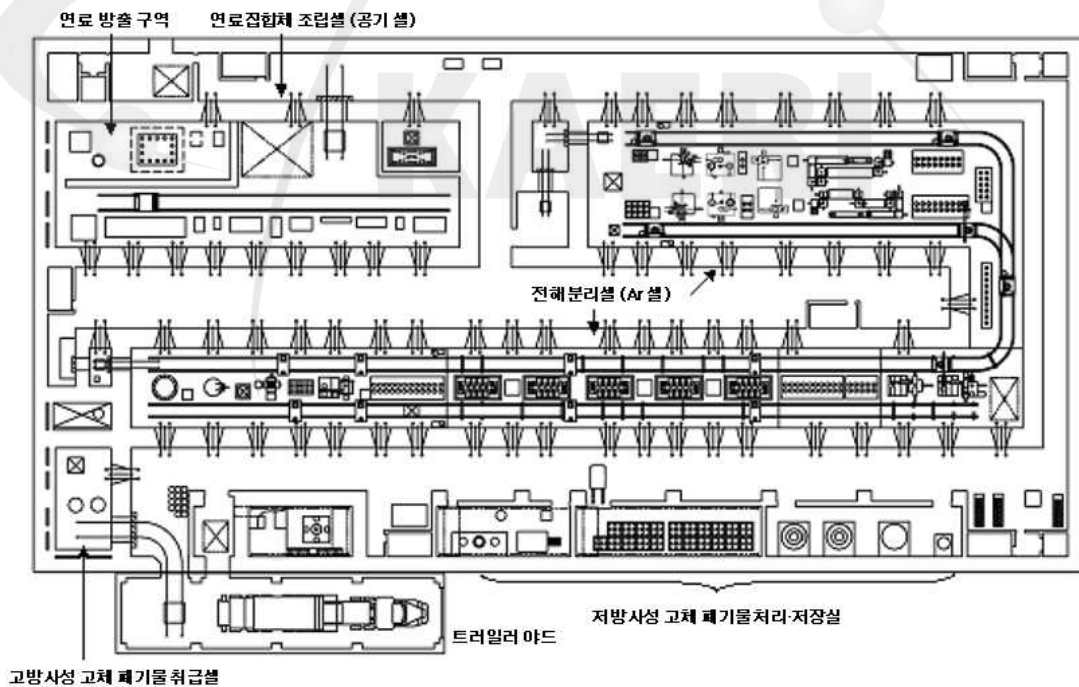


그림 3.20. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지상 1층 평면배치도 (38 tHM/yr).

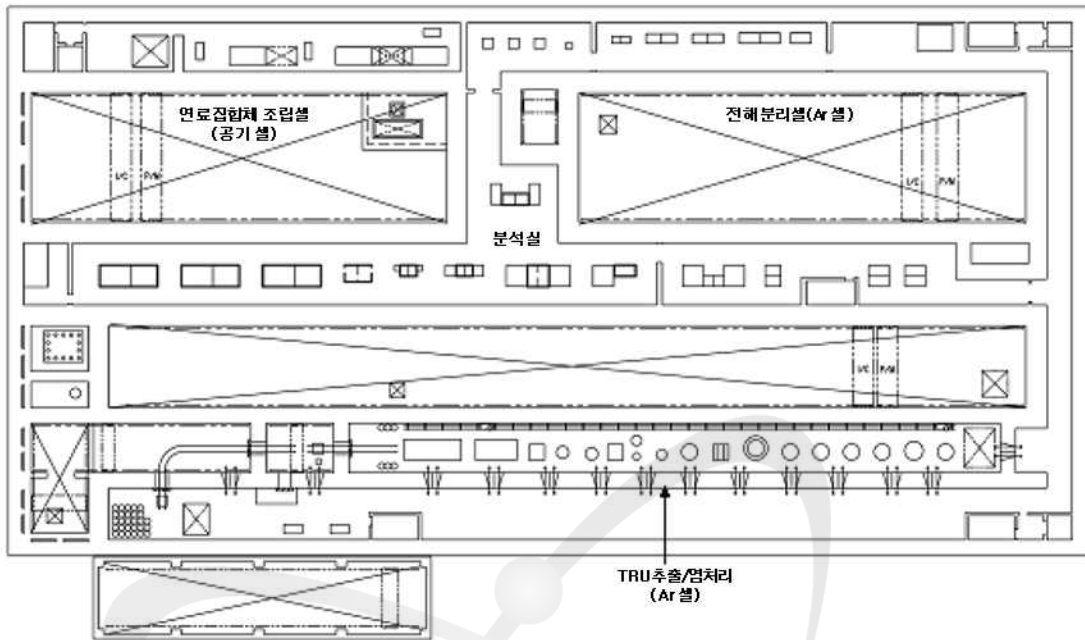


그림 3.21. 금속전해 금속연료 건식처리시설의 지상 2층 평면배치도 (38 tHM/yr).

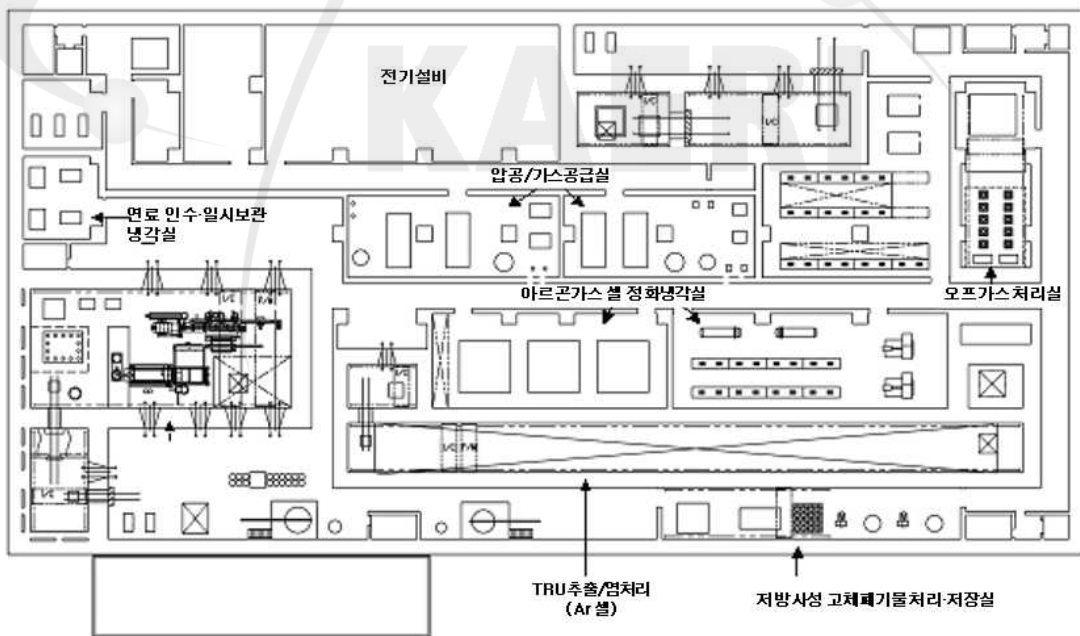


그림 3.22. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지상 3층 평면배치도 (38 tHM/yr).

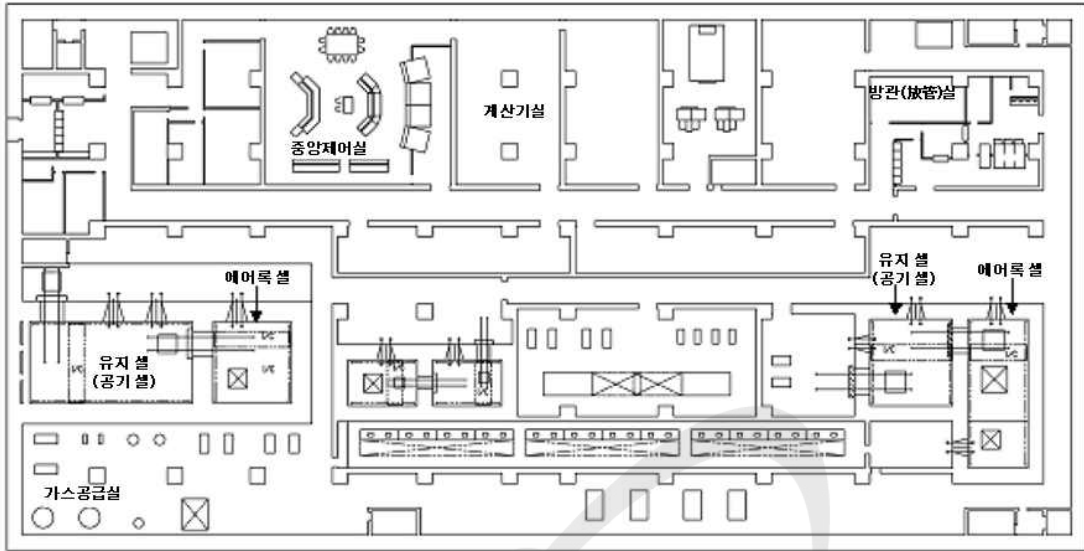


그림 3.23. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 지상 4층 평면배치도 (38 tHM/yr).

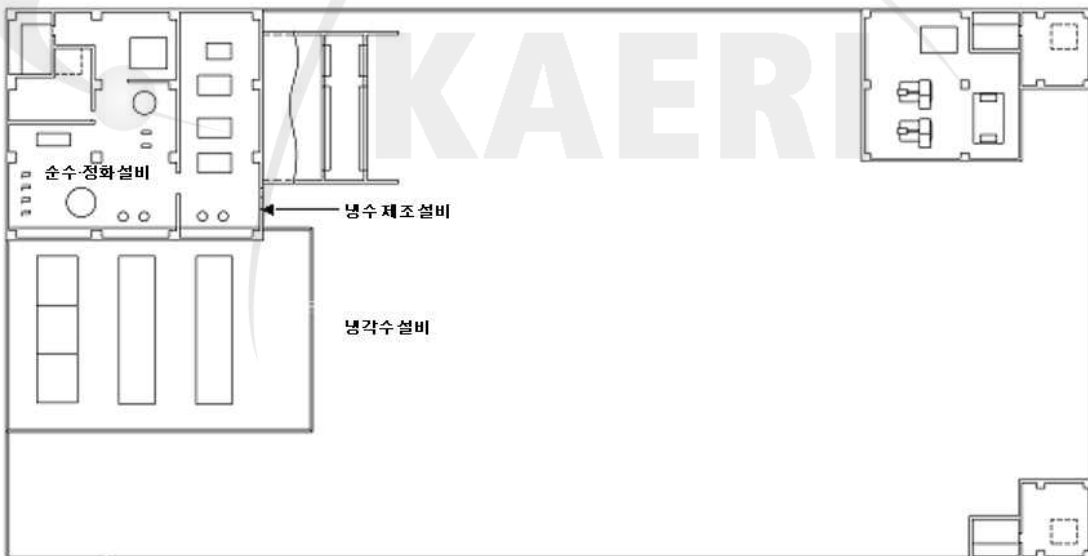


그림 3.24. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 옥상 평면배치도 (38 tHM/yr).

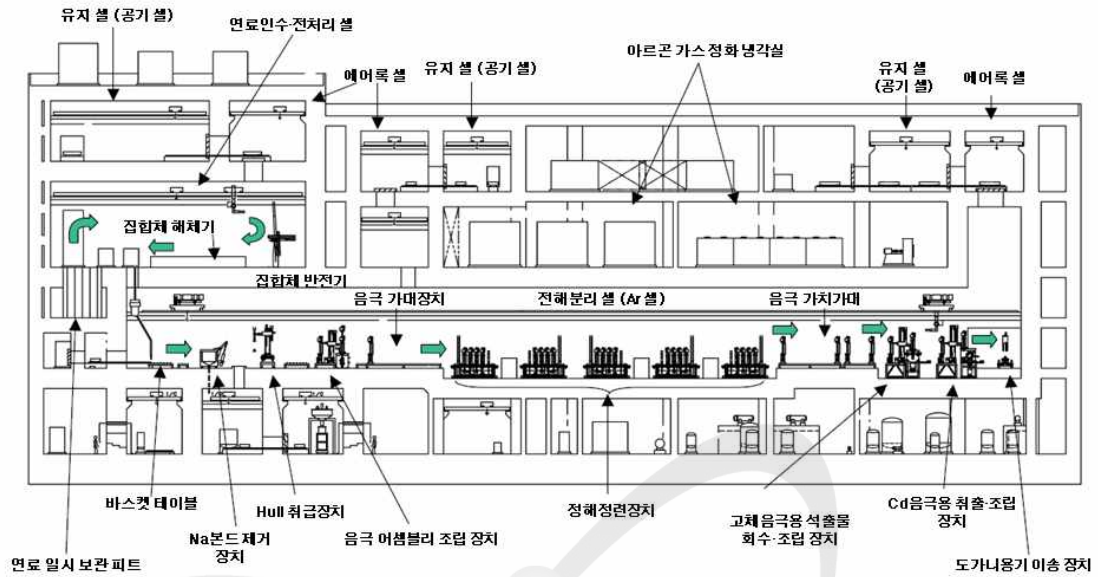


그림 3.25. 금속전해 금속연료 리사이클 시설의 A-A면 단면배치도 (38 tHM/yr).

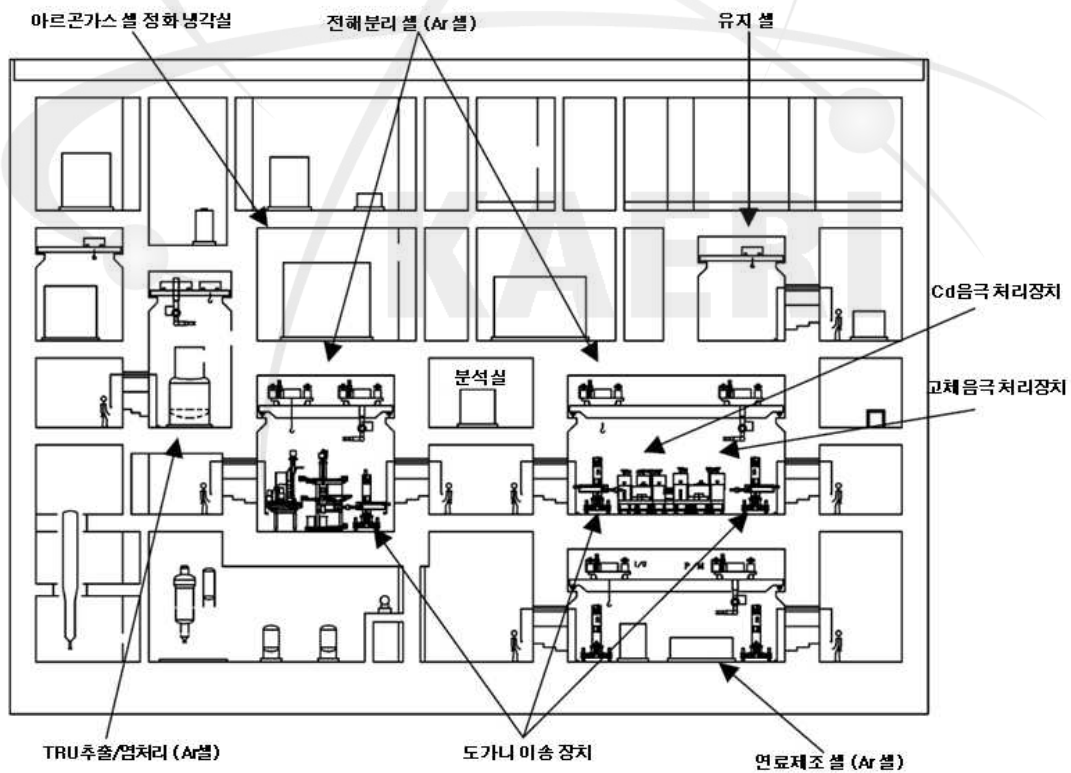


그림 3.26. 금속전해법 금속연료 리사이클 시설의 B-B면 단면배치도 (38 tHM/yr).

제 3 절 기술평가

1. 안전성

가. 안전설계

금속전해법에 근거한 전해처리 시스템에서 가정되는 이상사건을 추출하여 이러한 이상의 진전 시나리오에 따른 다중 방호개념에 근거한 안전설계 검토를 실시하였다.

(1) 방사선 방호 (차폐)

공정 내의 방사능 인벤토리를 갖는 대형 기기·탑 반응기는 충분한 차폐능력을 가지는 두께 2 m의 콘크리트 셀 내에 설치한다. 기기의 유지보수는 주 셀 내에 배치한 상태 혹은 주 셀 내 전용의 보수구역에서 실시한다.

앞에서 언급한 차폐 두께는 본 시스템에서의 선원강도를 평가한 후 결정하지 않고, 기존의 유사시설의 설계 예를 참조하여 정한 수치이며, 향후 상세 검토에 있어서는 합리적인 차폐 두께를 정하기 위해 상세 모델을 평가해야 한다. 또한 제염 후의 교환기기·폐기물류를 셀 밖으로 이송하는 것에 대한 순서, 제염방법, 선량의 확인방법 등에 관한 기술적 검토도 필요하다.

(2) 방사성물질의 밀폐

시설 밖으로 방출, 누설되기 쉬운 기체상의 방사성물질의 발생원이 되는 액체상, 분체상의 방사성물질을 밀폐한다. 방사성 물질을 포함한 액체는 고온의 용융염 및 액체금속 Cd이 있다. 이러한 폐액을 직접 취급하는 시스템 및 기기 (1차 밀폐 시스템)는 누설되기 어려운 구조로 설계하고, 만일 누설이 된다 하더라도 누설검지기 및 용기의 이중화 또는 누설액 받침접시를 설치한다. 금속전해 시스템의 1차 밀폐계의 누설은 원격 조작되는 인셀 카메라 등의 감시 기기가 다수 설치되어 있고, 차폐창이 설치되어

있어 적시에 누설검지가 가능하다. 또한 액체는 비교적 높은 융점을 가지고 있는 물질 (용융염 및 액체 Cd)만을 사용하기 때문에 누설을 방치한 경우라도 단시간에 누설액의 비등 등 다른 이상사건으로 과급될 가능성이 낮은 특성이 있다. 또한 질량관리에 근거해 임계안전이 확보되도록 설계하여 기기내의 재고량이 전부 누설된 경우라도 임계사고로 발전할 우려는 없다. 다만 취급 액체가 모두 고온이기 때문에 셀라이닝에 누설액의 열적 영향이 미치지 않도록 누설 가능성이 있는 시스템 및 기기에는 누설액 받침접시를 설치하거나 혹은 용기를 이중화한다. 또한 가열기능을 가지는 기기에 대해서는 이상가열로 기기 손상을 방지하기 위한 온도감시와 인터록으로 가열방지를 기능을 수행토록 설계한다.

방사성물질을 포함하는 액체를 적재하는 기기에 대해서는 기기 내부에서 발생하는 기체상의 방사성물질을 적절히 밀봉하는 기능도 요구된다. 반응기의 기밀성을 확보하는 것과 동시에 반응기의 기상부가 외부에 비해 부압에 유지하도록 설계함으로써 내부의 기체가 외부 누출되는 것을 방지한다. 본 시스템에서 취급하는 LiCl-KCl에 용해된 HM은 산소 및 물과 반응하여 불용해성의 산화물이 되는 성질을 가지고 있으므로 부압 유지설계로 한 경우에는 외부의 순도가 낮은 기체가 내부로 반입되어 불용해물의 생성을 촉진시킨다. 불용해물의 생성은 임계안전성에 위협요소가 되고, 품질관리, 계량관리의 점에 있어서도 중대한 문제가 된다. 그래서 본 시스템에서는 이러한 사항을 방지하기 위해 이러한 용융염을 내포하는 반응기의 기상부 압력을 셀 분위기에 비해 약간 정압을 유지하도록 설계한다. 따라서 동적인 밀폐기능은 가지지 않게 되므로 기기 자체의 기밀성의 확보가 중요한 과제가 된다. 다만 이러한 반응기 상부의 순도 및 압력을 제어하기 위해 각 반응기에는 Ar 가스의 공급라인과 배기라인 (기기·반응기 오프가스 시스템, 그림 3.27)을 설치한다. 배기는 오프가스 시스템에 설치된 각종 제염장치에 의해 동반하는 방사성물질을 제거한다.

기밀성 확보에 대해서도 물질 취급을 위해 반응기 전체를 용접구조로 하는 등의 방법은 적용하지 않았으므로 Cd·미스트트랩의 설치나 개폐부·전극 포트 등의 구조로 셀 환경에 방출하는 기체의 양 및 그것에 동

반되는 방사성물질의 양을 억제하도록 설계한다. 그러나 이와 같은 설계로는 외부 방출을 완전히 방지하지 못하므로 정상 시 셀 분위기의 오염을 어느 정도 허용하는 설계로 하는 수밖에 없다. 즉, 셀 레벨에서 기체상의 방사성물질의 밀폐성능이 무엇보다 중요하다.

또한 위에서 설명한 기기의 미정압운전이 성립하려면 셀 분위기 중의 방사성농도에 관한 평가를 하여야 하며 이를 위해서는 용융염의 방사성물질이 기상으로의 이행거동이나 발생하는 에어로졸의 특성, 이행률 및 실제 기기의 조작 시 누설률 등의 각종 자료를 취득할 필요가 있다. 이러한 자료는 적절한 오프가스 시스템을 설계하기 위해서도 중요한 자료가 된다.

Ar 셀에서는 활성금속의 화재방지 및 품질관리 상의 요구로 고순도를 유지할 필요가 있기 때문에 기밀성이 높은 라이닝이 부착되고, 고성능의 Ar정화 시스템을 설치한다 (그림 3.28). 따라서 NEXT법이나 산화물 전해법의 주 셀과 비교하면 Ar 셀 자체의 기체에 대한 밀폐능력이 뛰어나다. 다만 비순환(Once Through) 흡배기의 셀과 다른 셀 내의 냉각을 흡배기에 의존하는 것이 불가능하므로 Ar정화시스템에 냉각기능도 중요한 기능으로 부가된다. 또한 셀 자체에 전용 배기시스템(셀 오프가스시스템)은 설치하지 않고, 셀 내의 압력 제어는 셀 내의 기기·반응기 오프가스 시스템 및 에어록 배기를 통한 간접 배기, Ar의 공급 및 순환냉각시스템에 의한 온도제어를 통해 실시한다.

셀 자체는 배기시스템을 가지고 있지 않으므로 기기의 미정압 운전으로 셀 분위기 중에 누출된 방사성물질은 셀 정화시스템으로 제염되지만 기기 오프가스시스템에 흡인되는 방사성물질은 그 시스템에 설치된 높은 제염기능을 가지는 정화설비에 의해 제염 후 배기되므로 셀 내의 부압이 유지되고 있는 한 다량의 방사성물질이 시설 밖으로 방출되는 일은 없다. 또 셀 내에 다수의 고온기기가 설치되어 있어, 냉각기능 상실 시에는 열로 인해 부압유지가 곤란하게 될 경우가 있다. 이것에 대한 안전설계의 방법은 크게 두 가지가 있으며, 부압유지 등에 의한 동적인 밀봉 (confinement)을 중시하는 방법과 다른 하나는 동적기능에 의존하지 않고 구조물의 기밀·내압성능에 의존하는 정적인 격납 (containment)으로 대

응하는 방법이 있다. 전자는 냉각 상실 시에도 부압유지가 가능하도록 긴급 배기 시스템을 설치하고, 후자는 냉각 상실 시에 가정되는 최대압력 이하가 되어도 충분히 낮은 누설률을 달성할 수 있는 내압 고기밀 셀을 제작하는 경우이며, 어느 쪽을 적용하여도 표 3.9에 나타난 이점 및 결점이 있으며 최종적으로는 안전성능을 만족하도록 설계할 때의 경제적 합리성과 공학적 합리성에 근거하여 비교 판단한다.

본 설계에서는 밀폐 방법에 관계없이 Ar 셀의 기본성능으로 기밀성이 높아야 되므로 긴급 시의 안전성능에는 동적인 기능을 가능한 한 적용하지 않고, 기본적으로 정적 밀폐로 대응하도록 설계하였다. 이 경우 어느 정도의 압력에 견딜만한 필요가 있는지를 파악하기 위해 그림 3.29에 나타난 해석모델에 근거한 냉각기능 상실 시의 셀 내압·온도변동의 해석을 실시하였다. 실시 결과를 그림 3.30에 나타냈다. 그림에 나타난 위의 그래프에는 셀이 완전히 밀봉되고 셀 내 조명이 차단되지 않은 경우의 해석결과로 정적 밀봉에 의한 설계를 실시하는 경우에서 Ar 셀의 최대사용압력(설계기준)이 부여된다. 한편 하단의 그래프는 긴급 배기시스템에 의한 동적 밀봉으로 설계하는 경우에 긴급 배기 시스템에서 요구되는 최저 배기량을 부여한다. 이것으로 동적 밀봉에서는 최저 $165 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 의 배기 능력이 없으면 부압 유지가 불가능하고, 또한 기동 신호를 받고 나서 수 십 초 사이에 이러한 배기량에 도달하지 않고서는 공학적으로 합리적인 대책이 아니다. 정적 밀봉의 경우는 저 누설률 설계에서도 차압에 따라 셀 내의 오염된 Ar 분위기가 건물 내에 누설되고 나서 공중 피폭에 영향을 미치지만 누설률을 크게 $1.0 \text{ vol.}/\text{day}$ 를 가정하여도 시험 산출된 누설률에서 부지경계에서의 일반 공중 피폭선량을 구한 결과 10^{-10} mSv 정도였다. 내압성능에서도 최대압력이 $0.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 라면 충분하고, LWR 격납용기의 내압성능이 $4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 정도인 것을 감안하면 공학적으로 성립할 가능성은 충분하다고 판단된다.

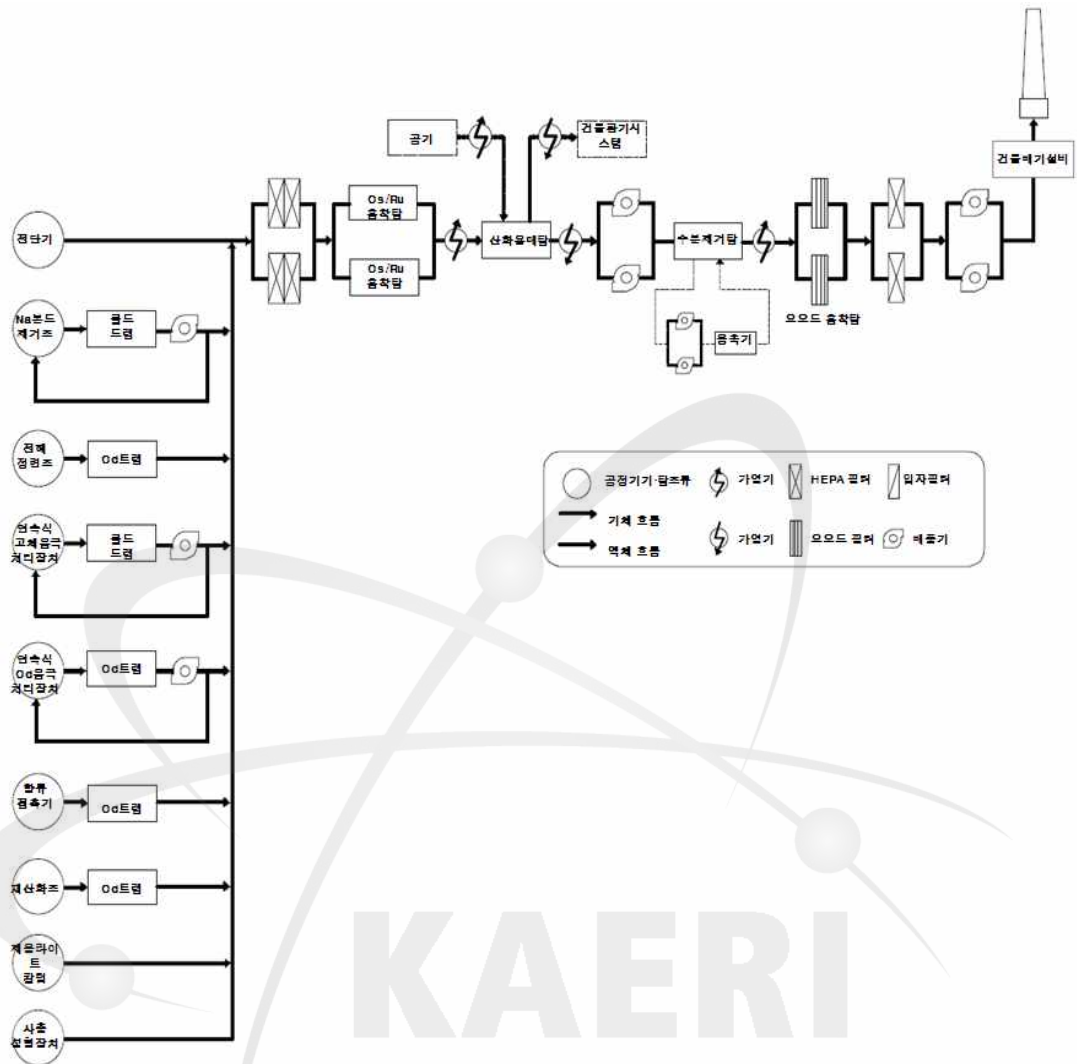


그림 3.27. 금속전해 시스템의 기기·탑반응기 오프가스 시스템.

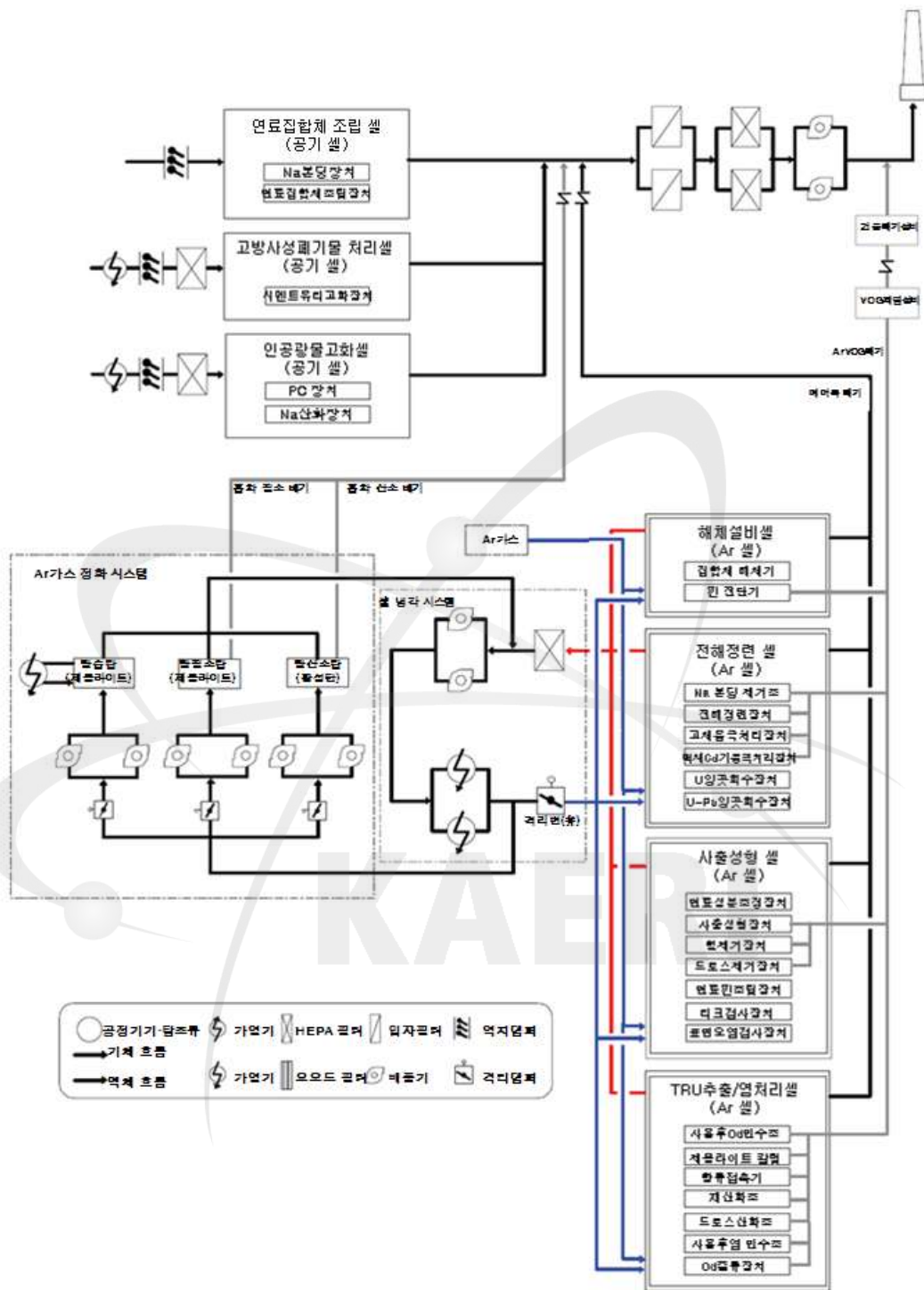
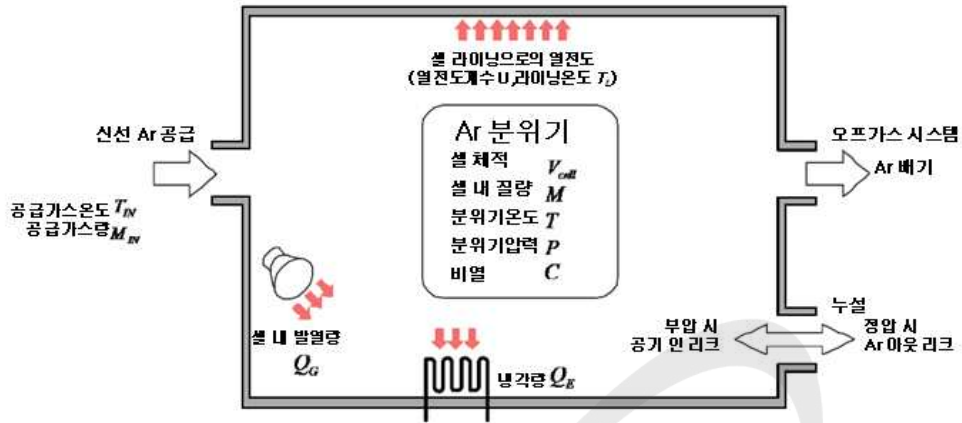


그림 3.28. 금속전해 시스템의 셀 환배기 시스템.

표 3.9. Ar 셀의 밀봉 설계에서 동적 밀봉/ 정적 밀봉 적용 결과

	동적 밀봉 중시	정적 밀봉 중시
압력 상승 사건이 일반 공중에 미치는 영향	<p>긴급 배기시스템으로 방출되는 셀 내 분위기가 시설 밖으로 방출된다. 압력을 유지하기 위해 기체의 팽창분 만큼 배기를 실시할 필요가 있으므로, 급배기량은 정적 밀봉중시의 경우와 크게 다르지 않다. 다만, 긴급 배기시스템에 특별한 제염장치를 설치하는 것이 가능하다면 방출량을 저감할 수 있다. 급배기시스템의 기동 및 배기가 사건 발생 시의 압력상승 속도만큼 빨라야 한다.</p>	<p>이상 발생 시, 셀에서 건물 내로 누설이 발생한다. 누설한 기체는 건물 배기 시스템을 통해 건물 밖으로 방출 된다. 정압상태가 유지되는 최대 시간과 누설률을 통해 최대 누설량을 구하고, 건물 배기 시스템에서 건물 밖으로 방출되어도 일반 공중에 과도한 피폭이 미치지 않도록 할 필요가 있다. 따라서 셀 분위기의 공간선량, 누설률 및 사건 유지시간에 따라 그 영향의 크기가 다르다. 건물 배기시스템에 특별한 제염장치를 설치하여 건물 배기시스템의 유량이 커지고, 이것이 평상시에도 작동하고 있다는 점에서 경제적으로 불리하다. 대안으로는 레드구역(셀 내)과 엄버(Umber)구역 사이에 중간구역을 설치하여 다중방호의 단층을 늘리는 것 등이 논의되고 있다.</p>
셀라이닝 강도	<p>평상시 부압상태에서 최대 압력 차를 견디는 강도</p>	<p>이상 시 가정 최대 압력 (정상 시)을 견디는 강도</p>
셀라이닝 기밀성	<p>화재발생방지 및 제품관리상 중요성능 및 Ar 정화시스템의 능력으로 정한 기밀성을 필요로 한다. 화재발생방지를 책임지는 안전기능을 가지고 있으므로, 평상시 부압상태에서의 기밀성 확인시험이 필요하다.</p>	<p>왼쪽 사항에 추가하여 압력 상승 시 기밀성이 요구된다. 요구되는 기밀성은 위의 일반 공중에 미치는 영향에 따라 결정된다. 또한, 이 상태에서 기밀성의 확인시험이 필요하게 될 가능성이 있다.</p>
부가적 안전 설비	<p>동적기기를 다중화한 긴급 배기시스템을 필요로 한다. 다만, 단시간의 모든 교류전원 손실 시에는 배기기 등의 동적기기의 작동은 유지되지 않으므로 부압유지 가능한 설계를 할 필요가 있다.</p>	<p>특별히 없음.</p>



[Ar셀 내의 에너지 수지식]

$$MC \frac{dT}{dt} = M_{IN} C (T_{IN} - T) + U (T_L - T) + (Q_G - Q_E) + V_{cell} \frac{dP}{dt}$$

[Ar가스 상태방정식]

$$P(t) = \frac{Rn(t)T(t)}{V_{cell}}$$

그림 3.29. Ar 셀 압력 변동 해석 모델.

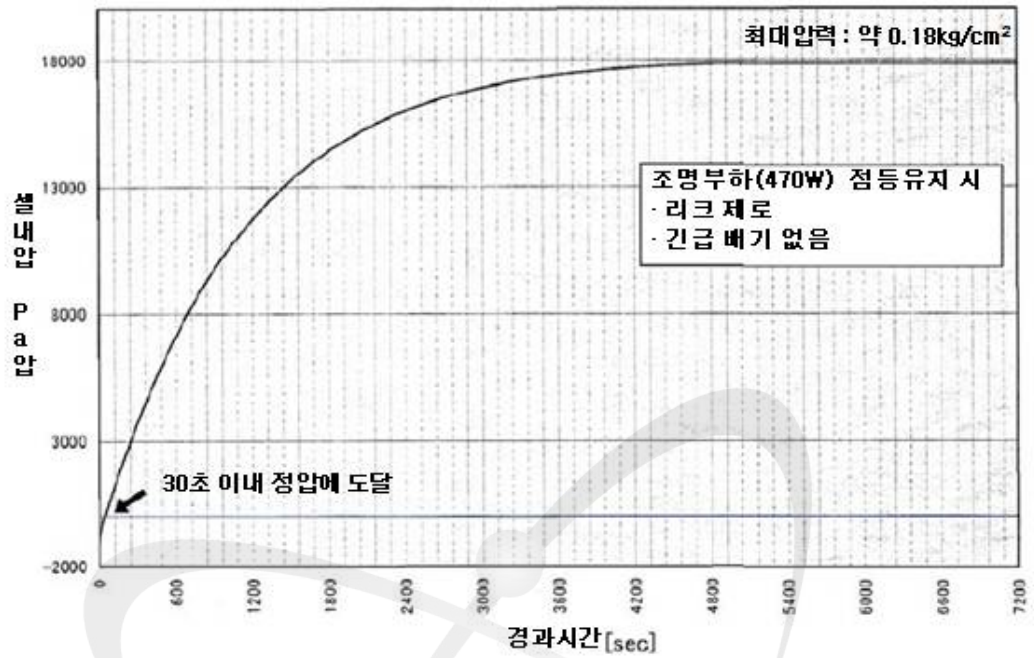


그림 3.30. Ar 셀 압력 변동 해석 결과(냉각기능 손실 사건).

(3) 핵연료물질의 임계방지

핵연료물질의 거동은 배치식의 이송기기에 의한 것이 기본이며, 공정 내에서 고체, 액체 등의 다양한 관리, 화학형태를 다룰 필요가 있으며 주된 임계관리방법은 질량관리로 하여 용적관리, 농도관리, Pu부화도관리, Pu동위원소관리를 적절히 조합하도록 한다.

또한, 주요공정 셀에서는 소량의 오일 등 유기물을 제외하고 물 등의 유사한 감속재의 사용이 없고 Ar 셀에서는 분위기 온도관리도 엄격하게 실시되기 위해 건조 시스템(비감속 시스템)이 있다. 다수의 유닛을 하나의 셀 내에서 취급하므로, 복수 유닛의 임계안전관리에는 이동관리 및 용기 구조에 의한 임계관리유지를 실시한다.

일반적으로 질량관리를 적용한 시설에서 이송을 실시할 때 문제가 되는 오장전, 과장전 등에 관해서는 핵연료물질의 이송관리를 원격 자동화된 운송시스템을 적용함으로써 운송시스템 및 프로세스제어 시스템 상에 적절한 인터록회로를 다중으로 적용시킨다면 충분히 회피가능하다고 판단된다.

각 공정에서 취급하는 핵연료물질의 특징에 따라 설정한 핵적 제한치를 표 3.10에 정리하였다. 전해프로세스에서는 핵연료물질은 다수의 다른 화학형태로 분산하여 존재하지만, 각각의 화학형태는 비교적 안정되어 있다. 이렇듯 다수의 화학형태가 존재하는 경우, 기존의 단순한 질량관리만으로 설계한다면, 그 중에서 가장 핵적으로 엄격한 화학형태를 기준으로 정해버리게 되면 핵적 제한치가 너무 적아지고, 시스템을 성립하기 위해 요구되는 양의 핵연료물질을 취급하는 것은 곤란해진다. 전해 프로세스에서는 개개의 화학형태가 비교적 안정되어 있으며 공학적으로 그러한 화학형태를 제어할 수 있는 가능성이 있다는 점을 고려하여 화학형태마다 질량관리를 실시하여 「화학형태관리」를 적용하는 것으로 비교적 많은 핵연료물질을 안전하게 취급한다는 방법론을 제안했다(그림 3.31). 이 방법론에 따른 각 화학형태의 핵적 제한치를 표 3.11에 나타내었다. 특히 불용해물과 이것과 관련한 용융염 속의 Pu량의 핵적 제한치에 대해서는 계량기술의 정도나 프로세스 제어의 신뢰성에 따라 정해질 필요가 있으나, 그러

한 기술은 향후 개발과제로 남기 때문에 현시점에서는 구체적인 수치로 나타낼 수 없다.

표 3.10. 금속전해에서의 핵적 제한치

	핀 전단~양극 어셈블리 조립 (음극 바스켓)	액체 음극 취출~음극 처리 (액체 Cd 음극)		
화학형태	연료 전단핀 (HM-Zr 합금)	PuCd ₆	Pu 금속	U-Pu 금속
Pu부화도	20 %	100 %	100 %	□ %
Pu동위체 비율	Pu238/239/240/241/242=1/68/26/2.5/2.5			
추정임계 하한값	45 kg-Pu	196 kg-Pu	5.9 kg-Pu	8.6 kg-Pu
안전계수	-	-	0.7	-
핵적 제한치	2.3 kg-Pu	-	4.1 kg-Pu	-
통상 취급량	1.14 kg-Pu (Pu 부화도 17%이하)	□kg-Pu(3.5 kg-HM) (Pu 부화도약□%)		
비고	통상 취급량을 2중 오장전하는 경우가 발생하여도 통상 절차로 취급하도록 설정. 통상 취급량은 전해정련조에서 1단위 처리량과 전극수로 결정된다.	전해공정에서 취출한 액체 Cd 음극을 분석 없이 후 공정에 이송하여 처리할 수 있도록 가장 엄격한 Pu 부화도를 기준으로 설정. 2중 오장전 또는 2중 오석출이 발생하여도 Pu 금속의 추정 임계 하한치 이하가 된다.		

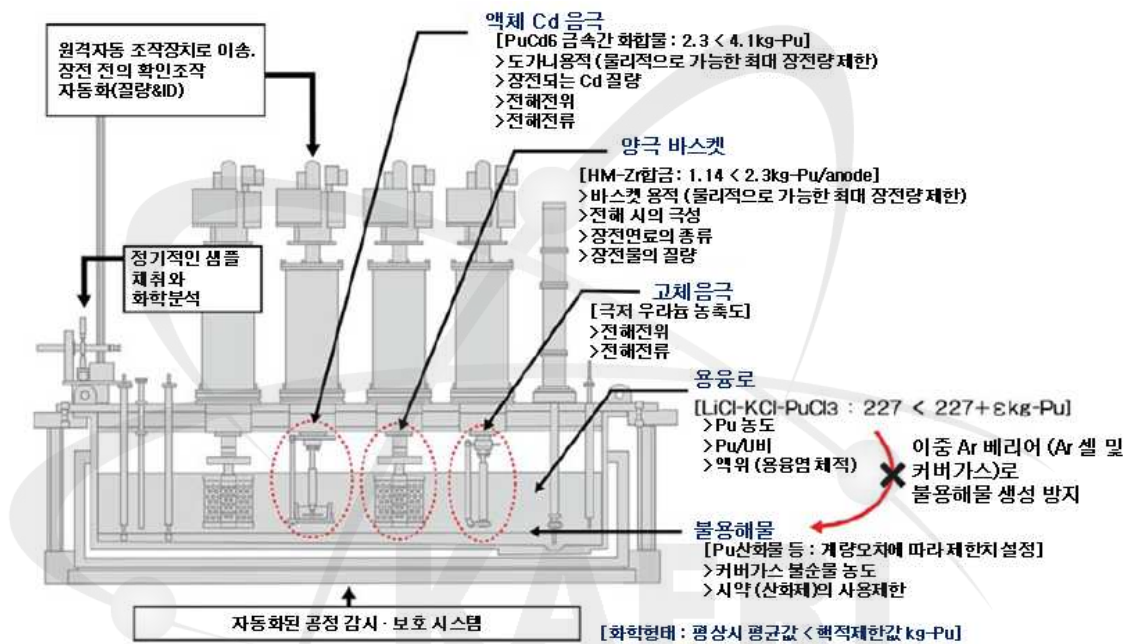


그림 3.31. 전해정련조에서 화학형태 관리 병용 질량 관리의 개념도.

표 3.11. 화학 형태 관리를 적용한 전해정련조의 핵적 제한치

	양극	용융염	Cd 풀	액체 Cd 음극	불용해물
화학형태	HM-Zr 합금	LiCl-KCl-PuCl ₃	Cd-Pu 합금	PuCd ₆	PuO ₂
Pu부화도	20 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Pu 동위체비	Pu238/239/240/241/242=1/68/26/2.5/2.5				
추정임계 하한값	45 kg-Pu	2,557 kg-Pu	-	196 kg-Pu	57 kg-Pu
핵적 제한치	2.3 kg-Pu	227×(1+ε) kg-Pu		4.1 kg-Pu	40 kg-Pu 미만
통상 취급량	1.14 kg-Pu/양극	227 kg-Pu	-	□ kg-Pu	-
비고	<p>전해정련조로 인수되기 전에 조성분석 및 계량을 실시한다. 전해전류값, 전해전위를 감시한다.</p> <p>용융염과 Cd 풀의 Pu량을 관리한다. 용융염 액위, Pu 농도 및 U/Pu비로 제어한다. 핵적 제한치는 불용해물의 검지와 관련하여 염의 Pu 계량 기술의 신뢰성·정도에 의존한다. 위 ε는 통상 범위로써 허용하는 프로세스 변동 및 계량 오차의 폭</p> <p>전해전류값, 전해전위 및 염의 U/Pu비에 의한 석출물의 양 및 조성을 제어한다. 적절한 전위로 전류가 흐르지 않는 한, 염의 Pu가 전극에 석출하는 일은 없다.</p> <p>핵적 제한치는 추정임계 하한값에 안전계수 0.7에 불용해물의 발생을 감지하는 기술의 신뢰성, 계량 기술의 정도에 의존하여 결정된다. 불용해물 생성의 원인이 되는 불순물의 침입은 전해정련조의 Ar 커버가스 및 Ar 셀의 2중 베리어로 방지된다.</p>				

이 방법론을 현실화하려면 적용할 시스템에 화학적 변화에 대한 폭넓은 정보를 얻는 것과 동시에 임계방지설계상의 요구 즉, 2중 우발성 원리의 적용에 견딜만한 신뢰성이 높은 감시·제어기술을 개발할 필요가 있고 또한 실용화에 있어서 중요한 과제이기도 하다.

음극처리장치는 본 시스템 내에서 가장 핵적으로 엄격한(임계질량이 적음) 화학형태 (U-Pu합금)로 핵연료물질을 취급한다. 그리고 처리능력 향상과 기기대수의 저감을 위해 밀어내기식의 연속로 방식을 취하고 있으므로, 액체 Cd 음극 회수물을 넣은 증류도가니를 다수 취급한다. 전극에서 빼낸 회수물은 전극단위로 개별 증류용 도가니(그림 3.32)에 장전되어 처리장치 속에 넣고 그림 3.33과 같이 최대 26개로 늘어놓고 증류 처리한다. 도가니의 이동은 밀어내기식이지만 도가니 사이가 직접 접촉되지 않도록 트레이에 실어서 밀어내기 조작 시 가득차거나 전도를 방지하기 위해 가이드레일을 설치하여 pusher의 구동력으로 제어한다. 증류로의 가열방식이 유도가열이므로 도가니본체는 유도가열에 적합한 두께를 가지는 graphite, 트레이는 자기장 통과와 내열성을 고려해 세라믹재로 한다.

음극처리장치는 3개의 터널형 가열로로 구성되어 있으며 마지막에 있는 가열로가 가장 많은 수의 도가니 (10개)를 적재한다. 위와 같은 설계에 근거한 연속식 음극처리장치에서 임계안전성을 확인하기 위해 그림 3.34에 나타난 해석모델의 평가를 실시하였다. 이 모델은 3개의 연속로 배치가 보수적으로 모델화되었기 때문에 각 도가니는 구의 형태를 지니며, 도가니 재료는 4 cm 두께의 graphite 반사체를 사용했다. 개개의 도가니 내의 연료물질로는 표 3.12에 나타난 2가지 케이스를 가정하여 해석을 실시했는데 평상시 장전되는 HM이 모두 Pu라고 해도 미임계를 유지할 수 있다는 사실을 확인하였다. 또한 Pu부화도 %에서 추정임계 하한질량은 (Pu동위체가 모두 Pu-239라고 해도) 도가니 당 5.9 kg-Pu이며, 평상시의 Pu 장전량의 배 이상이 된다. 따라서 본 검토에서 설정한 취급량은 충분한 안전여유를 가진다고 판단된다.

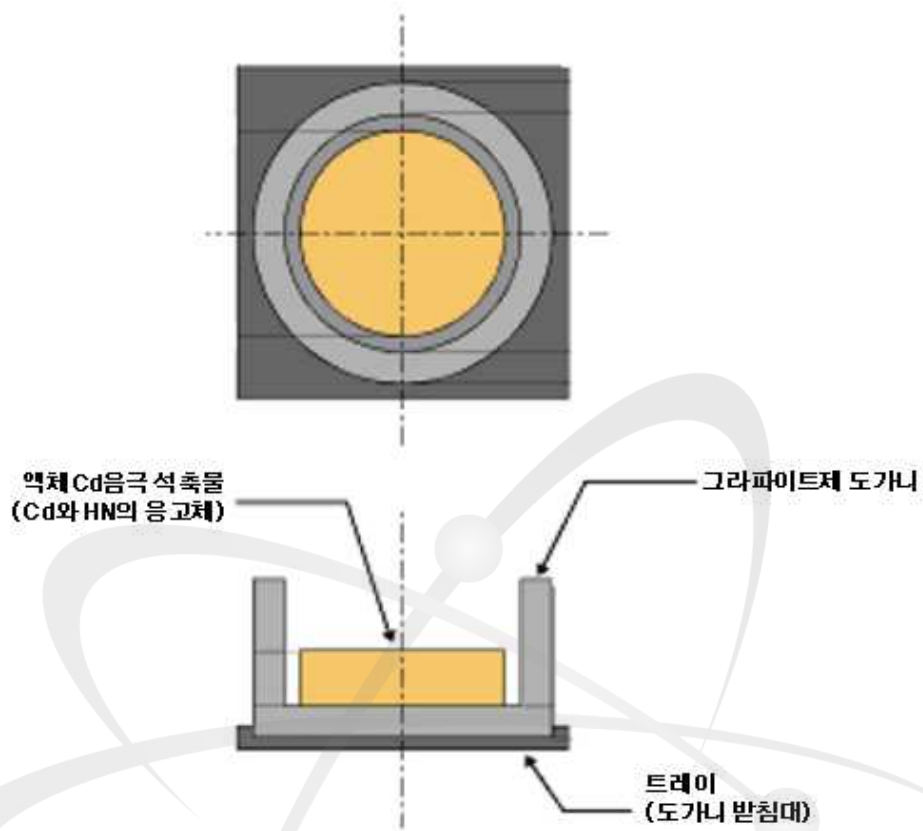


그림 3.32. 증류 도가니.

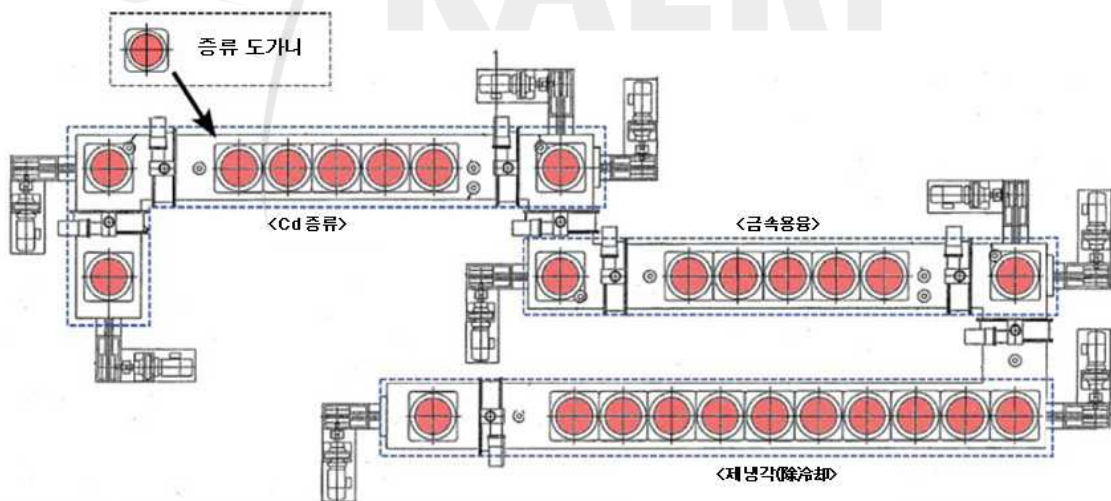


그림 3.33. 연속식 Cd 음극처리장치 평면도.

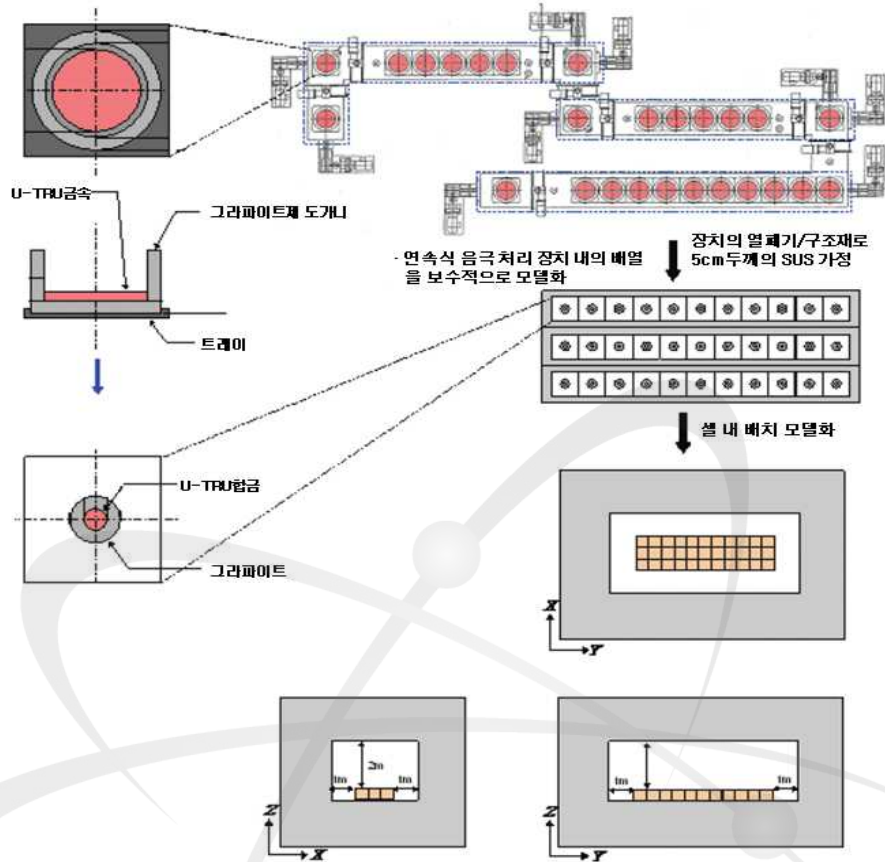


그림 3.34. 연속식 음극처리장치 (액체 Cd 음극)의 임계 안전 해석 모델.

표 3.12. 연속식 음극 처리장치의 임계안전해석

	케이스1	케이스2
화학형태	Pu 금속	U-Pu 합금
Pu 부화도	100 %	□ %
Pu 동위체비	Pu-239	
본드 장전량	3.5 kg-Pu	3.5 kg-HM
계산결과	0.8914	0.7074
위 조건에서 도가니 장전량을 파라미터로 한 추정임계 하한값 ($k_{eff}+3\sigma < 0.95$ 가 되는 최대값)	4.25 kg-Pu	8.56 kg-HM

용융한 HM금속을 직접 적재하는 도가니의 파손은 다음에 나타낸 두 가지 안전상의 우려를 가진다. 하나는 고온액체 금속이 처리장치본체의 케이싱이 파손되어 장치 밖(셀)으로 누설되는 것과 다른 하나는 복수의 도가니의 동시 파손으로 인한 질량관리로 유지되는 임계안전성에 중대한 영향을 미치는 것이다.

금속전해법에서는 셀 내 분위기가 고순도 Ar 분위기이므로 전자의 사건에서 화재 등의 다른 중대사건으로 확대될 가능성은 다른 안전기능의 장애가 동시에 일어나지 않는 한 발생하지 않는다. 또한 누설량이 적고, 고융점물질인 점에서 누설 후, 냉각되어 고화되므로 기상으로의 확산은 제어된다고 생각된다. 만약 기상으로 이행되었다 하더라도 Ar 셀의 환배기가 저풍량 간접 배기이므로 시설 밖의 누설량은 충분히 저감된다. 따라서 가장 고려해야 할 사항은 후자인 복수의 도가니가 동시에 파손되어 임계사고로 확대되는 것이다.

비금속재료는 일반적으로 금속재료와 비교하여 고온강도나 압축강도, 내식성이 우수하지만 인장강도가 낮고 연성이 부족하다. 따라서 부서짐이나 크랙 등 응력집중을 일으킬 국소결함이 있다면 파단응력 이하라도 파손될 가능성이 있다. 이것은 절대적인 신뢰성을 장기간에 걸쳐 유지하는 것이 요구되는 원자력기기에 비금속재료를 적용하기 어려운 이유 중의 하나이다.

여기서 대상으로 한 종류 도가니는 (1) 강도부재가 아니며 (2) 수십 년에 걸쳐 내구성을 요구하는 것이 아닌 적시 교환이 가능하고, (3) 인셀 카메라나 검사 장치에 의한 건전성 확인·검사가 가능하다. 또한 앞으로 상세검토를 실시하여 위 결점을 보완하는 설계를 하여 단일 파손에 의한 밀봉기능 상실을 방지하는 것은 가능하다고 판단된다.

따라서, 여기서 이용하는 종류 도가니는 앞에서 언급한 조건 아래에서 사용한다는 전제로 적절한 검사 순서, 사용 유지 기준과 크랙을 확대시키지 않는 재료·구조설계로, 비금속재료의 적용이 가능하다고 판단하였다.

더욱이 다중방호의 관점에서 만에 하나 도가니 파손 시 누설한 Pu를 포함하는 금속이 1개소에 굳어지지 않도록 분리된 누설액 받침접시를 설

치한다(그림 3.35). 또한 고온의 누설액으로 받침접시가 과잉 열 충격을 받지 않도록 사이에 완충판을 설치하여 내열성이 뛰어난 재료 (텅스텐이나 몰리브덴)의 적용 등의 대책을 세우고 있다.

장치 밖에서의 도가니 취급은 내용물은 고화한 상태 (금속 잉곳)로만 취급하고 질량 관리된 양을 운송·저장용의 용기에 수납하여 한번에 1개 밖에 취급하지 않으므로 도가니의 파손만으로도 안전성이 크게 손상되는 사태는 발생하지 않는다.

이러한 설계 개념을 실제 적용할 경우에는 재료의 각종 성능 자료의 취득, 제작 시 품질보증·검사 방법 확립 및 누설에 대한 설계 대응에 관한 기능 타당성 확인을 실시할 필요가 있다.

전해정련공정 및 음극처리공정 이외 공정의 임계관리에 있어서도 2중 우발성 원리를 만족하는 시스템 설계를 요구하고 있다. 이것을 만족하는 경우, 임계사고 발생은 기술적으로 가정할 수 없게 된다. 따라서 임계관리 시스템을 책임지는 모든 시스템 및 기기를 높은 신뢰성을 만족 할 수 있도록 개발·설계하는 것이 앞으로의 과제이다.

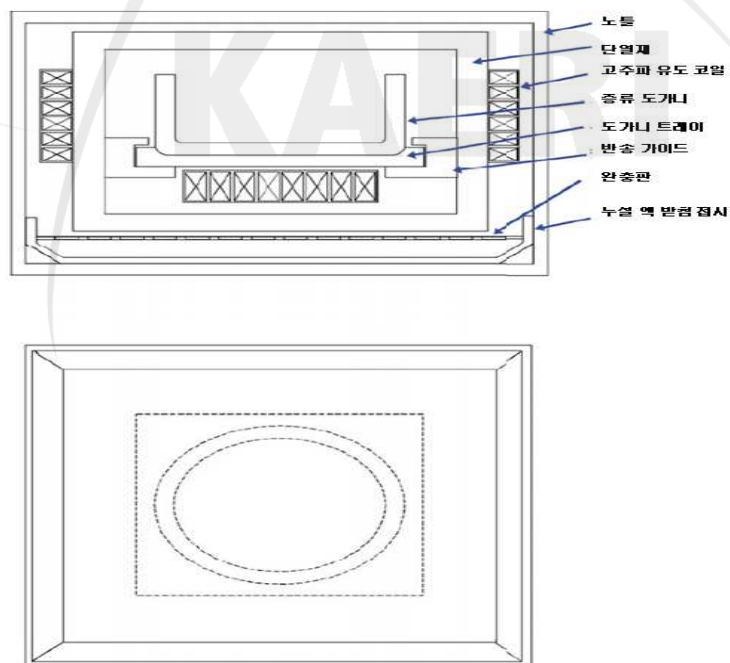


그림 3.35. 연속식 Cd 음극처리장치의 누설액 받침 접시 개념.

(4) 지진 고려

「재처리시설 안전심사지침」, 「우라늄·플루토늄 혼합산화물 연료가공 시설안전심사지침」의 내진요건 및 록카쇼 재처리시설 등 기존 시설의 내진설계방식에 근거하여 예비적 검토를 실시하였다. 이러한 관점에서 공정 내 많은 핵연료물질 및 방사성물질을 내포하는 전해저장조와 반응성이 높은 형태의 방사성물질을 내장하는 음극처리장치에 대해서는 내진 클래스 A로 설계한다.

금속전해 전해정련조는 금속용기이므로 강구조에 의해 내진성을 확보하도록 한다. 산화물 전해법의 전해장치와 같은 면진장치를 적용하는 것도 있겠지만, 전해장치와 비교해서 전해저장조의 면적이 크고(1기 당 설치면적이 4.5배 정도) 작업 시 총중량도 크므로 이것에 필적하는 면진장치의 구체화가 어렵고 강구조와 비교하여도 경제성은 좋지 않다고 판단된다. 다만 향후 기술개발로 실현 가능성이 명확해 진다면 재검토할 가치가 있다.

(5) 동적으로 유지되는 안전 기능

금속전해 처리시스템의 주요공정에서 취급하는 핵연료물질의 물성은 고융점·고비등점을 가지므로 기기 수준에 있어서 내장하는 열원의 자연냉각이 가능하여 별도의 안전냉각시스템의 설비는 필요로 하지 않는다.

Ar 셀 내부에는 고온열원이 다수 설치되기 때문에 셀 분위기의 온도 및 압력상승을 막는 셀 수준의 부압유지 및 밀봉의 건전성을 유지할 필요가 있다. 따라서 셀 냉각시스템은 안전상 중요한 시설이다. 이 시스템의 동적기기 및 안전시스템 냉각공급시스템은 독립된 이중 시스템으로 비상용 소내 전원시스템에 접속되어 있다. 동적인 밀봉을 유지하는 오프가스 처리설비, 셀 환기설비 및 건물환기설비의 동적기기에 대해서도 독립된 이중 시스템으로 비상용 소내 전원계통에 접속되어 있다.

따라서 동적기기의 단일고장 및 외부전력 손실을 고려하여 동적으로 유지되는 안전상의 기기가 손실되는 일은 없다.

(6) 시스템 및 프로세스 고유의 위험성 고려

본 시설의 고유 위험성으로는 「반응성이 높은 악티나이트 금속의 화재」, 「고온매체에 의한 설비손상」, 「고온열원에 의한 셀 내 압력상승」, 「핸들링기계의 이상동작 등에 의한 설비손상」을 들 수 있다. 방사성물질을 적재하는 시스템 및 기기는 높은 곳에 설치되는 경우가 없고 취급유체 (염 및 액체금속)는 용점이 높기 때문에 비등 등의 현상은 생기지 않는 특성을 가지고 있으므로 이러한 누설로 인한 다량의 기체상 방사성물질이 발생할 위험성은 적다고 생각된다.

「반응성이 높은 악티나이트 금속의 화재」에 대해서는, 음극처리공정에서 연료핀 설치공정까지는 핵연료물질 자체가 연소반응을 일으킬 우려가 있는 금속형태를 밀봉하지 않고 취급하므로 금속화재에 대한 고려가 필요하다. 화재의 가능성에 대해서는 기타 금속 리튬이나 금속 Cd가 있다. 이러한 화재의 방지책으로는 셀 분위기 자체를 불활성 Ar 가스로 채워 산소 등의 반응물을 제거하는 동시에 산소농도계로 감시를 실시한다. 과거에 실시한 U, Pu 금속계의 발화에 관한 연구결과에 기초해 비표면적의 넓어도 산소농도가 1 % 이하라면 금속화재를 방지할 수 있다. 또한 비표면적이 작은 잉곳상이라면 200 °C 이하로는 공기 중으로 자연발화 하지 않는다고 보고되어 있다. 따라서 Ar 셀 분위기 중의 산소농도에 대해 1 % 화학적 제한치로 설정하는 (정상시 관리목표치는 100 ppm 이하) 동시에 U, Pu 금속을 기기 또는 용기 밖으로 꺼내 셀 분위기에 놓는 경우에는 온도 관리값이 200 °C 이하인 것을 확인한 후에 취급하도록 한다.

Ar 셀 바운더리의 파손으로 산소가 유입되어 금속화재가 발생한 경우, Ar 가스 긴급주입시스템으로 산소농도를 저하시키는 대책이 제공되지만 소화의 유효성은 미확인된 상태이다. 또한 셀 체적이 크기 때문에 긴급주입으로 단시간에 산소농도를 저하시키기 위해서는 대용량의 Ar 가스 공급 시설을 필요로 한다. 따라서 바운더리 파손의 가능성이 가장 우려되는 Ar 분위기 냉각시스템의 차단기능이나, 셀 내 방화구획의 설치, 셀의 밀봉성 확보 등 확대방지·중식대책의 종합적인 검토가 필요하다. 그리고 사용하는 기기 등에는 불연성·난연성 재료를 사용하므로 이러한 금속화재가 대

용량 화재로 발전하지는 않는다.

「고온매체에 의한 설비손상」은 고온물질의 누설에 의해서 셀 라이닝 등의 밀봉 바운더리가 손상을 받지 않도록 고온물질을 유지하는 시스템 및 기기의 용기를 이중화하고 누설 받침 접시를 설치하여 만일 누설된다 하더라도 누설물이 직접 셀 라이닝에 접촉하지 않도록 설계한다. 또한 개개의 가열장치에는 과열 방지 인터록을 설치하여 온도 이상으로 발생하는 설비손상을 방지한다. 동시에 과잉 가열능력을 가지지 않도록 설계하여 과열의 잠재적 위험성을 저감한다.

「고온열원에 의한 셀 내 압력상승」은 앞에서 설명한 「밀봉」항을 참고한다.

「취급기계의 이상동작 등에 의한 설비손상」은 통상 작업 시에 사용하는 운송기기는 동선이 고정화되어있는 것을 사용하기 때문에 취급기계와 설비의 간섭을 배제하고 있다. 유지보수 등을 위해 비정기적으로 사용하는 크레인 등의 장치에 대해서는 인터록을 설치함과 동시에 이송경로상의 아래에 방사성물질을 적재한 기기가 배치되지 않도록 하는 등의 대책과 물질 취급·유지보수성을 검토할 필요가 있다.

나. 안전평가

사출성형에 의한 연료제조시설을 포함한 전해처리 및 연료제조 일체형 참조 시스템(38 tHM/yr처리능력)을 대상으로 평가를 실시하였다.

(1) 결정론적 안전평가

(가) 평상시 일반 공중의 선량평가

정상운전 시 시설에서 대기 중으로 방출되는 방사성물질에 의한 최대 피폭지점에서 일반 대중의 개인이 받는 방사선 피폭평가를 ATRENO-TERFOC 코드를 이용하여 실시하였다.

배기관에서 방출되는 방사성물질의 양에 대해서는 시설의 연간처리량

을 기초로 한 설계에서 설정하였던 대기 이행률에 근거해 설정하였다(표 3.1 참조). 시설 내에서 방사성물질의 제염은 HEPA 필터, 요오드 필터, 트리튬제거장치 등의 능력을 적절하게 고려하였다.

- ① 방사성물질을 대기에 방출하는 배기구의 지상 높이, 내경 및 송풍속도는 (주)원연의 록카쇼 재처리시설의 주배기관과 같은 조건으로 가정하였다.
- ② 기상조건은 「문주」 부지에서 과거에 관측했던 기상 자료를 참고로 하여 설정하였다.
- ③ 방사성물질의 경구섭취량을 예측함에 있어서, 개인이 섭취하는 모든 식품은 해당 개인의 피폭평가 지점에서 생육하는 것으로만 가정하였다.

그 결과, 1년간 조업기간 중의 평상시 대기로 방출되는 방사성물질에 의한 개인의 예탁실효선량은 최대선량을 받는 지점에서 약 0.76 $\mu\text{Sv/yr}$ 로 추정된다. 판단기준인 50 $\mu\text{Sv/yr}$ 이하를 충분히 달성가능하다고 평가되었다. 또한 핵종 내역은 표 3.13에 나타난 바와 같이 ^{14}C 의 기여가 가장 큰 약 41 %를 차지하고 있다.

표 3.13. 평상시 피폭 평가에서 가정한 주요 핵종의 대기방출 방사능

	^{85}Kr	^3H	^{129}I	$^{14}\text{C}^{1)}$
1년간 반입되는 사용후핵연료 양(Bq/yr/시설)	2.1E+16	1.8E+15	1.8E+11	1.8E+12
대기로의 이행률	1	0.1	0.01	1
연간 대기방출량(Bq/yr/시설)	2.1E+16	1.8E+14	1.8E+09	1.8E+12

1) 신연료 중 질소함유량을 50ppm으로 가정

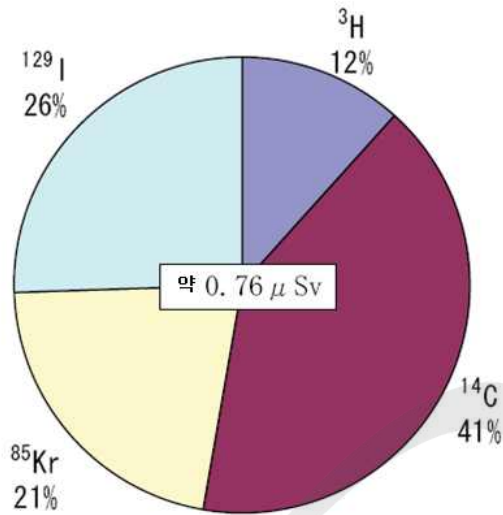


그림 3.36. 평상 시 실효선량에 기여하는 핵종 내역.

(나) 대표적 이상사건의 영향평가

평가대상 시스템에서 기술적 발생이 가정되는 이상사건을 빠짐없이 체계적으로 추출하기 위해 시스템의 주요 공정에 대한 변동 요인이 되는 이상사건 또는 변동 결과를 일으킨다고 생각되는 이상사건을 검토하여 표 3.14에 정리하였다.

다음으로 도출한 이상사건을 방치한 경우의 영향을 검토하여 이상사건 선정을 위해 분류 정리하였다. 이 중에서 소시스템의 크기나 방출되는 방사성 물질의 확산용이성에 주목하여 주변 공중에 대한 방사선피폭리스크의 우려가 있는 사건으로 다음과 같은 3가지 종류의 이상사건을 평가대상으로 선정하여 사건 발생 시 주변 공중의 개인이 받는 실효선량당량을 평가하였다.

- 용융상태의 핵분열생성물 및 연료핵종을 시설 내에서 가장 대량으로 적재하는 전해조에서의 사용후염 이송시 셀 내에 염 전량 누설
- Ar 셀 바운더리 파손에 따른 공기 침입으로 생기는 Cd음극 처리장치에서 방출되는 Pu-U합금 잉곳 화재

[전해정련조에서 셀 내로 적재물 전량 누설]

전해정련조 장치에 적재되어 있는 용융염 및 Cd 전량이 셀 내에 누설 되었을 때, 누설 사건은 전해정련조 본체의 철제용기의 파손 혹은 염이송 중에 이송배관의 파손 및 제어회로의 동시고장으로 일어날 가능성이 있다. 본 피폭평가에서는 내부피폭 만을 고려했으므로 인벤토리가 크고 선량계수가 큰 HM핵종만을 고려한다. 이러한 점에서 전해정련 프로세스의 HM 농도 및 조성은 프로세스의 진전에 있어서 크게 변동하지 않기 때문에 프로세스 기준상태의 염으로 가정한다. 누설에 의해 용융염 속의 방사성물질의 어느 정도의 비율이 기상으로 이행할지에 대해서는 확실한 자료가 존재하지 않으므로 수용액의 누설에서 이행률 0.001 (전량 1/1000)을 적용한다.

본 사건이 발생하면 누설한 비휘발성의 방사성물질이 기상 중의 염 미스트에 동반되어 셀 내를 순환하고, 이때 일부는 전단기 부근에 설치된 기기 오프가스 시스템의 흡입구 등에서 기기 오프가스 시스템으로 유입되어 주배기관에서 배기된다. 셀 내를 순환하고 있는 사이에 셀 냉각·정화계로 유입되면 그 시스템에 설치된 HEPA 필터 등으로 포획되지만 기상으로 이행한 것 중에, 셀 냉각 시스템으로 유입하는 비율은 불분명하기 때문에 본 평가에서는 무시 한다. 한편 기기 오프가스 시스템에서 배기는 그림 3.27과 같이 전단 2단의 HEPA 필터와 후단 1단의 HEPA 필터를 통과한 후, 건물 배기 시스템으로 보내져 주배기관으로 배기된다. 기기 오프가스 시스템은 약 200 Nm³/h 정도의 배기 능력밖에 없으므로 본 사건으로 발생하는 다량의 염미스트에 의한 기능은 상실한다고 가정하여 건물 배기 시스템 2단 HEPA 필터의 DF값은 합계 10⁵정도이며, 주변공중의 피폭량 (내부 피폭에 의한 실효선량당량 및 실효선량)을 산출하였다. 결과는 표 3.15에 나타난 바와 같이 안전평가상의 기준치 5 mSv를 충분히 밑도는 0.0028 mSv였다 (ICRP Pub.72의 선량계수로 계산한 경우에는 0.0027 mSv였다).

표 3.14. 금속전해법 건식처리 시스템으로 가정되는 이상사건과 설계대응

가정되는 이상사건의 도출				설계 대응책		
이상사건 카테고리	발생기기/ 공정	원인	진전 시나리오	발생방지	영향완화/종식	과제
핵연료의 임계	전해정련조	과잉 장전 또는 축적	오조작 (오이송, 다중장전, 축적 확인 무시에 의한 핵연료물질이 과잉 존재)	인수물질의 분석/계량/확인 위 작업의 자동화. 염의 HM농도 관리	특별한 설비 대응 없음. ※Ar 셀 분위기의 배기는 기기 오프가스시스템을 통한 간접 배기로 한다. 따라서 임계 시에 방출되는 요오드는 기기 오프가스 시스템에 설치된 요오드 흡착탑에 의해 제거될 것이라 기대된다.	임계사고에 대해서는 2중 우발성 원리를 바탕으로 발생방지설계를 중심으로 설치한다. 따라서 개개의 발생방지책은 극히 신뢰성이 높은 장치, 로직 및 시스템으로 구축되어야 한다.
		Cd 풀에서 Pu-Cd 화합물의 이상축적	액체 Cd 음극 또는 과잉으로 석출한 Pu-Cd 화합물의 일부가 음극에서 흘러 넘쳐 전해조 하부 Cd 풀 내에 축적	액체 Cd 음극의 용적 및 장전 Cd량 제한. Cd 풀의 HM 농도 관리. 전해전류 감시.		
		핵연료물질 음극으로 이상석출	양극-음극의 전위가 역전한 상태로 전해조작을 실행	전극 커넥터의 형상 등에 의한 배선 실수를 배제한다.		
	연속식 음극처리장치	과잉장전	프로세스 도가니 다중장전	다중화된 인수물질의 계량/확인. 위 작업의 자동화.		

가정되는 이상사건의 도출				설계 대응책		
이상사건 카테고리	발생기기/ 공정	원인	진전 시나리오	발생방지	영향완화/종식	과제
핵연료의 임계	연속식 음극처리장치	복수의 도가니 동시 파손/전도	연속로 내의 복수 도가니가 동시에 파손되거나 내포하는 Pu 합금이 누설, 장치 하부에 축적	도가니의 재료 및 제조 품질 확인. 도가니의 유지기준에 근거한 예방보전(정기적인 검사 및 교환). 누설액 받침 접시 설치. 누설검지기 설치.		
방사성 물질의 밀봉 기능 상실 (방사성물질의 방출 경로의 이상)	전해정련조	용융염 유지용기의 파손/누설	용융염을 유지하는 용기 파손 (부식 또는 열적, 기계적 손상, 경년열화)으로 Ar 셀 안으로 HM, FP를 포함한 용융염이 직접 누출	누설이 어려운 재질/구조의 용기 사용	누설검지기 및 2차용기 설치. 용융염은 고융점이므로 외부에서의 열공급이 없는 경우에는 고화한다.	누설검출기술의 검토를 필요로 한다. 정량적평가를 위해서는 용융염 방사성물질의 기상으로의 이행률 자료를 취득할 필요가 있다.
		용융염 overflow	용융염 공급량의 과잉에 의한 overflow된 용융염이 Ar 셀 안으로 직접 누출	염 공급 조작의 배치화 액위계와 연동한 인터록 압력계에 의한 이상검지		
		오프가스라인의 기능손실/폐쇄	배기 송풍기 고장 콜드트랩 필터 폐쇄 위 현상으로 오프가스 배기경로유지가 곤란해져 기기에서 Ar 셀로 직접 오프가스가 누출	예비기 설치	압력연계에 의한 감시를 실시하고, 예비적 대응을 마련한다.	

가정되는 이상사건의 도출				설계 대응책		
이상사건 카테고리	발생기기/공정	원인	진전 시나리오	발생방지	영향완화/종식	과제
	연속식 음극처리 장치	프로세스 도가니 파손/전도	도가니의 열적·기계적 파손, 경년열화 취급 중 전도 등 현상으로 내장한 연료물질이 Ar 셀 내로 직접 비산한다.	도가니 검사. 온도계 감시. 파손기기로의 낙하방지 구축 누설액 받침 접시의 노내 설치	장치 내에서 손상 시 장치 압력 바운더리가 밀봉기능 제공. 장치 밖에서 손상은 내장물은 고체이기 때문에 대용량의 방사성물질 방출 발생은 없다	
		내압바운더리 파손	셀 부의 손상으로 외부 Ar 셀 분위기가 유입	압력계, 온도계로 셀의 건전성 감시.	장치 내 부압유지가 이루어져 대용량의 방사성물질 방출은 없다.	
		진공배기 라인 폐쇄	진공 펌프 배관 내에서 염/Cd가 축적, 고화하는 것으로 장치 내 진공도의 저하가 발생함.	필터류의 적절한 설치와 보수.	압력계에 의한 감시와 이상 발생 시 증류 조작 중지.	
	Ar 셀 분위기 냉각 시스템	Ar 셀 분위기 냉각시스템의 기능손실	Ar 셀 분위기 냉각 시스템의 냉각기능 (냉각수 공급 시스템 등)이 손실되어, 셀 내 온도 상승에 따른 압력상승으로 내외부의 압력차가 역전. 그 결과, 셀 내 분위기가 건물 내로 누설한다.			

가정되는 이상사건의 도출				설계 대응책		
이상사건 카테고리	발생기기/공정	원인	진전 시나리오	발생방지	영향완화/종식	과제
방사성 물질의 기상으로의 이행량 증대 (방사성물질의 방출량 증대)	전해정련조	용융염 온도 상승	온도제어의 고장 등으로 가열장치이상 발생하여 기상으로 이행률 증대.	온도계와 연동한 인터록 설치. 히터용량 제한.	없음	
		공급 Ar 가스 증대	Ar 가스 압력 제어시스템 또는 유량제어 시스템의 고장으로 오프가스 유량 증대.	압력계로 검지와 예비적 대응.	오프가스 시스템 HEPA 필터 등으로 정화.	
		FP 축적	염정화 작업의 부적절로 염의 FP가 축적하여 기상으로 이행률이 증대하는 것과 함께 붕괴열로 인한 조 내 온도 상승이 발생함.	염정화 조작의 자동화.	없음.	
	음극처리장치	HM금속 잉곳 화재	Ar 셀 바운더리 파손으로 유입한 공기와 금속 잉곳이 반응하여 화재에 이끔.	Ar 셀 바운더리에는 전면 라이닝을 실시하여 외부 분위기가 누설하기 어려운 구조로 함.	Ar 셀 분위기 산소 농도계 설치. 산소농도 상승방지를 위한 긴급 Ar 가스 주입 시스템 설치.	HM금속 열적/화학적 제한치를 정하기 위해 연소조건 등의 자료를 취득할 필요가 있다.

가정되는 이상사건의 도출				설계 대응책		
이상사건 카테고리	발생기기/ 공정	원인	진전 시나리오	발생방지	영향완화/종식	과제
	Ar 셀 분위기 냉각 시스템	Ar 셀 분위기 냉각시스템 배관 파손	Ar 셀 분위기 냉각시스템의 순환루프배관이 파손되어 공기가 셀 내로 침입한다. 셀 분위기에 개방되어 있던 HM금속이 공기와 반응하여 화재를 일으킴.	냉각 시스템은 독립한 2개의 시스템으로 구성된다. 냉각 시스템 출구에서 산소농도 상승을 감지하여 이상이 있는 시스템을 적절히 분리하는 것이 가능하다. HM금속은 200°C이하가 되지 않으면 기기 또는 용기에서 나오지 않도록 인터록을 설치한다.		
		Ar 셀 분위기 냉각 시스템 오가동	대기하고 있는 냉각장치가 오작동하여 셀 분위기의 과냉각에 의한 내외부 차압 증가. 응력증대로 셀 라이닝이 파손되고 공기가 셀 내로 침입한다. 셀 분위기에 개방되어 있던 HM금속이 공기와 반응하여 화재를 일으킴.			

[Ar 셀 바운더리 파손에 의한 공기침입 및 금속화재]

연속식 음극처리장치는 증류, 가열용융 후에 냉각 공간이 있기 때문에, 고온상태인 U-Pu 금속이 셀 분위기에 노출되지 않는다. 그렇지만 공기침입에 의한 셀 분위기 이상 시, 냉각되지 않은 잉곳을 처리장치에서 잘못 빼냈다고 가정하여 U-Pu 합금의 화재를 가정하였다. 동 장치 1대에서 빼낸 잉곳(도가니 1개 분량)의 전량이 연소한다고 가정하고 연소생성물의 1/100이 기상으로 이행하며 그 전량이 기기 오프가스 시스템으로 보내진다고 가정하였다(금속 화재에서 이행률은 불분명하기 때문에 용매화재 시 이행률과 같다고 가정). 기기 오프가스 시스템에는 3단의 HEPA 필터가 설치되어 있지만 용량이 작기 때문에 매연의 흡착으로 그중 1단이 기능 상실한다고 가정하였다. 건물 배기설비의 2단 필터를 아울러 DF값은 합계 10^9 정도였다(ICRP Pub.72 선량계수로 계산한 경우에는 2.16×10^{-8} mSv). 예를 들어 기기 오프가스 시스템의 HEPA 필터가 전단 손상된 경우라도 2.15×10^{-4} mSv 정도이므로 기준치를 만족한다.

위와 같이 서술한 2종류의 이상사건과 함께 실효선량에 대한 판단기준(5 mSv 이하)을 만족한다고 평가할 수 있다.

(2) 확률론적 안전평가

확률론적 안전성 평가법을 이용하여 방사성물질 방출 리스크 및 주변공중의 건강영향리스크를 개략적으로 산출하였다. 리스크 평가에서 기기고장률 등에 대해서는 문헌을 참고로 판단할 수 있는 기기 및 고장 방식 자료를 인용하였다.

(가) 평가 개요

결정론적 안전평가에서 서술한 바와 같이 시설 내의 전 공정 중에 방사성물질을 대량으로 함유하는 전 공정을 대상으로 이상사건을 도출하여 현저한 양의 방사성물질의 시설 외 방출요인의 관점에서 이상사건을 엄선, 아래와 같이 평가대상을 선정하였다.

- 전해정련조에서 염 방출 배관의 파손에 의한 전 용융염의 셀 내 누설 (이하, 「용융염 누설」)

전해정련조에서 염처리 공정으로 이송할 때에 이송용기로 용융염을 이송하는 배관 파손, HM 등이 포함된 용융염이 셀 내로 누설된다. 누설 검지기의 고장 혹은 이송중지조작의 실패에 의한 장치 내의 전 용융염이 셀 내로 누설한다. 누설 용융염 내의 방사성물질의 0.001이 미스트와 함께 기상으로 이행한다. Ar 셀 냉각 시스템, 기기 오프가스 시스템 및 건물 배기설비의 HEPA 필터는 염 미스트의 부착에 의한 차압상승으로 확률적으로 파손된다고 가정했다.

- Ar 셀 바운더리 파손 및 연속식 음극처리장치 Ar순환계 배관의 동시 파손에 의한 Pu금속 등의 화재 (이하, 「Pu금속의 화재」)

Ar 셀 냉각 시스템의 미세관이 파손되어 외부의 공기가 셀 내로 유입된다. 셀 내 산소농도의 이상검지 실패 또는 Ar 셀 원격조작 실패로 인해 Ar 셀 내의 산소농도가 화학적 제한치를 넘는다. 동시에 연속식 Cd 음극처리장치의 Ar 셀 내의 산소농도가 높아진 셀 분위기가 음극처리장치 내에 유입되고 내부에 있는 HM 금속이 연소한다. 연소에 의한 연소물 중의 방사성물질의 0.01이 기상으로 이행한다. Ar 셀 냉각 시스템, 기기 오프가스 시스템 및 건물 배기설비의 HEPA 필터는 매연의 부착으로 차압 상승하여 확률적으로 파손한다고 생각했다.

- 사출성형장치로의 과잉장전에 따른 임계 (이하, 「임계」)

공정제어 시스템의 잘못된 명령, 자동제어 시스템의 물질 취급 실패 또는 공정 데이터베이스 정보의 오류로 임계질량을 넘는 Pu를 사출성형장치에 장전하여 임계가 된다. 임계에 의한 총 핵분열수는 10^{19} 으로, 발생한 에너지에 의한 장전물에 포함되는 방사성물질의 0.001이 비산하여 기상 중으로 이행하는 것으로 하였다. Ar 셀 냉각 시스템, 기기 오프가스 시스템 및 건물배기설비의 HEPA 필터는 더스트 등의 부착에 의한 차압 상승으로 확률적으로 파손된다고 가정했다.

표 3.15. 「전해정련조에서 셀 내로 내포물의 전량누설」 사건의 개요 피폭평가

	동위원소 조성	기준형태의 염 중 인벤토리		비방사능	방사능 인벤토리	대기로의 이행률	DF	대기 중의 방출량 [Bq]	흡수율 R[m ³ /s]	상대농도 X/Q [s/m ³]	선량계수 H ₅₀ (Pub.30)	내부피폭 [mSv]				
		원소량	핵종량													
U234	0.0001		0.0065	2.308E+11	1.504E+09	0.001	1.00E+05	1.50E+01	3.33E-04	1.30E-06	3.6E-05	2.3E-10				
U235	0.0015		0.0515	8.010E+07	4.126E+06			4.12E-02			3.3E-05	5.9E-13				
U236	0.0004		0.0173	2.396E+09	4.153E+07			4.15E-01			3.4E-05	6.1E-12				
U238	0.9980		60.5622	1.242E+07	7.525E+08			7.52E+00			3.2E-05	1.0E-10				
U		60.64														
Pu238	0.0130		2.0008	6.339E+14	1.268E+15			1.27E+07			1.0E-04	5.5E-04				
Pu239	0.5816		116.5899	2.303E+12	2.685E+14			2.68E+06			1.1E-04	1.3E-04				
Pu240	0.3266		51.0295	8.455E+12	4.315E+14			4.31E+06			1.1E-04	2.1E-04				
Pu241	0.0407		6.1279	3.815E+15	2.338E+16			2.34E+08			2.3E-06	2.3E-04				
Pu242	0.0382		6.1657	1.414E+11	8.718E+11			8.72E+03			1.1E-04	4.2E-07				
Pu		181.91														
Np237	1.0000		0.6958	2.611E+10	1.817E+10			1.82E+02			1.3E-04	1.0E-08				
Np		0.70														
Am241	0.6825		6.5275	1.269E+17	8.280E+14			8.28E+06			1.2E-04	4.3E-04				
Am242m	0.0280		0.1786	3.600E+14	6.429E+13			6.43E+05			1.1E-04	3.1E-05				
Am243	0.2896		2.9375	7.381E+12	2.168E+13			2.17E+05			1.2E-04	1.1E-05				
Am		9.64														
Cm242	0.0004		0.0008	1.394E+17	1.145E+14			1.15E+06			4.4E-06	2.2E-06				
Cm243	0.0099		0.0115	1.932E+15	2.223E+13			2.22E+05			8.0E-05	7.7E-06				
Cm244	0.8248		1.4805	2.996E+15	4.436E+15			4.44E+07			6.4E-05	1.2E-03				
Cm245	0.1650		0.2761	6.352E+12	1.754E+12			1.75E+04			1.2E-04	9.1E-07				
Cm		1.77														
HM		253.9638 6			3.0836E+16						3.80E+08		합계 [mSv]		2.872E-03	

표 3.16. 「Ar 셀 바운더리 파손에 의한 대기 침입 및 금속화재」 사건의 개요 피폭평가

	동위원소 조성	기준형태의 염 중 인벤토리		비방사능	방사능 인벤토리	대기로의 이행률	DF	대기 중의 방출량 [Bq]	흡수율 R[m ³ /s]	상대농도 X/Q [s/m ³]	선량계수 H ₅₀ (Pub.30)	내부피폭 [mSv]					
		원소량	핵종량														
U234	0.0001		0.0001	2.3131E+ 11	2.8201E+ 07	0.01	1.00E+ 09	2.82E-04	3.33E-04	1.30E-06	3.6E-05	4.4E-15					
U235	0.0008		0.0010	8.0000E+ 07	7.7132E+ 04								7.71E-07	3.3E-05	1.1E-17		
U236	0.0004		0.0003	2.3958E+ 09	7.7723E+ 05								7.77E-06	3.4E-05	1.1E-16		
U238	0.9988		1.1335	1.2447E+ 07	1.4108E+ 07								1.41E-04	3.2E-05	2.0E-15		
U		1.1349															
Pu238	0.0110		0.0250	6.3367E+ 14	1.5820E+ 13								1.58E+ 02	1.0E-04	6.8E-09		
Pu239	0.6409		1.4547	2.3006E+ 12	3.3468E+ 12								3.35E+ 01	1.1E-04	1.6E-09		
Pu240	0.2805		0.6367	8.4334E+ 12	5.3697E+ 12								5.37E+ 01	1.1E-04	2.6E-09		
Pu241	0.0337		0.0765	3.8153E+ 15	2.9172E+ 14								2.92E+ 03	2.3E-06	2.9E-09		
Pu242	0.0339		0.0769	1.4139E+ 11	1.0877E+ 10								1.09E-01	1.1E-04	5.2E-12		
Pu		2.2698															
Np237	1.0000		0.0090	2.6088E+ 10	2.3403E+ 08								2.34E-03	1.3E-04	1.3E-13		
Np		0.0090															
Am241	0.6769		0.0289	1.2701E+ 14	3.6747E+ 12								3.67E+ 01	1.2E-04	1.9E-09		
Am242m	0.0185		0.0008	3.5984E+ 14	2.8478E+ 11								2.85E+ 00	1.1E-04	1.4E-10		
Am243	0.3046		0.0130	7.3806E+ 12	9.6093E+ 10								9.61E-01	1.2E-04	5.0E-11		
Am		0.0427															
Cm242	0.0005		0.0000	1.2241E+ 17	4.4577E+ 11								4.46E+ 00	4.4E-06	8.5E-12		
Cm243	0.0065		0.0001	1.9112E+ 15	9.7440E+ 10								9.74E-01	8.0E-05	3.4E-11		
Cm244	0.8370		0.0066	2.9953E+ 15	1.9656E+ 13								1.97E+ 02	6.4E-05	5.4E-09		
Cm245	0.1561		0.0012	6.3554E+ 12	7.7764E+ 09								7.78E-02	1.2E-04	4.0E-12		
Cm		0.0078															
HM		3.4553			3.0836E+ 16									3.41E+ 03		합계 [mSv]	2.150E-08

이러한 이상사건에 대해서 관련시설의 응답이나 이상 시의 운전원의 행동을 검토하는 것으로 시설 밖으로 방출되는 방사성물질 양의 영향을 미치는 인자를 결정하여 동 인자의 성공/실패의 갈림을 표시한 이벤트 트리를 구축하는 것으로 리스크 평가 상 중요한 사건 시퀀스를 누설 없이 결정했다. 그리고 원인사건의 발생빈도를 폴트 트리 방법으로 산출하고, 이벤트 트리의 갈림 확률을 평가하는 것으로 사건 시퀀스 발생빈도를 산출하였다. 또한 사건 시퀀스 별로 기대되는 밀봉기능(예, HEPA 필터의 능력)을 고려해서 시설 밖으로 방출되는 방사성물질의 양을 추정하였다.

배기관 조건은 록카쇼 재처리시설과 동일하게 하고 기상조건은 「몬쥬」부지에서 과거에 측정된 기상 자료를 참고로 하여 설정하고, 최대 피폭지점에서 방출 방사능에 의한 주변공중의 급성사망 및 50년간 방사선 피폭에 의해 사망에 이르는 암의 발생확률을 사건 시퀀스 별로 환경영향 리스크 평가 코드 MACCS257를 이용해서 산출하였다.

(나) 평가결과

고려한 이상 사건 시퀀스에서 가장 방사성물질의 방출량이 많아지는 시퀀스의 발생빈도는 폴트 트리 및 이벤트 트리로 해석하여 $10^{-6} \sim 10^{-17}$ /년의 범위인 것을 알게 되었다. 이러한 사건에 의한 치사암 발생 리스크는 이상사건에 기인하는 리스크의 추정치가 약 1.0×10^{-11} 사망/인/년/시설 이었다. 이 때문에 1부지 당 1시설의 입지를 제안하여 치사암 발생 리스크에 대한 판단 기준 (10^{-6} 사망/인/년 사이트 이하)을 충분히 만족한다고 판단할 수 있다.

다음으로 그림 3.38에 상세한 리스크 프로필을 나타냈다. 리스크에 지배적인 시퀀스는 사출성형장치로 임계사고가 발생하여 오프가스 시스템 및 건물 환기 시스템이 건전한 시퀀스이다. 치사암 발생 리스크에 지배적인 시퀀스에서의 지배적인 핵종은 임계사고에서 새롭게 발생하는 단반감기의 방사성 희가스이다. 사건 발생 당 치사암 발생확률은 극히 적으며, 사건의 연간 발생 빈도가 높기 때문에 치사암 발생 리스크에 가장 큰 기여를 하는 것으로 결과가 나왔다. 임계 안전설계로 PS기능에 중점을 두고 그 발생빈도를 낮출 다양한 배리어가 설계되어 있음에도 불구하고 이와 같이 발생빈도의

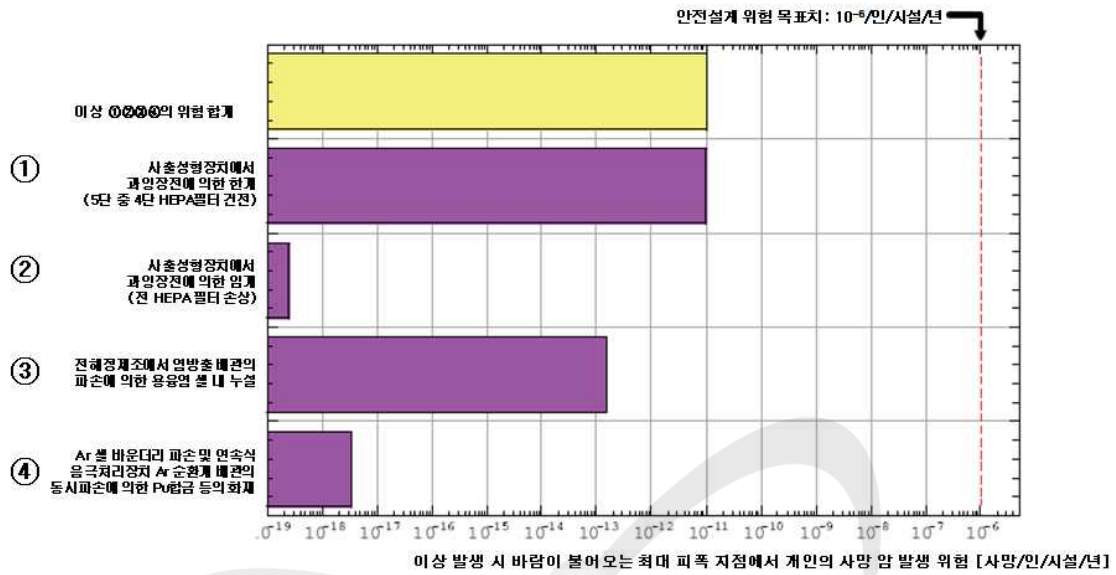


그림 3.37. 금속전해법 시스템에서 일반 공중의 연간 치사암 발생확률의 추정결과 중 이상사건의 내역.

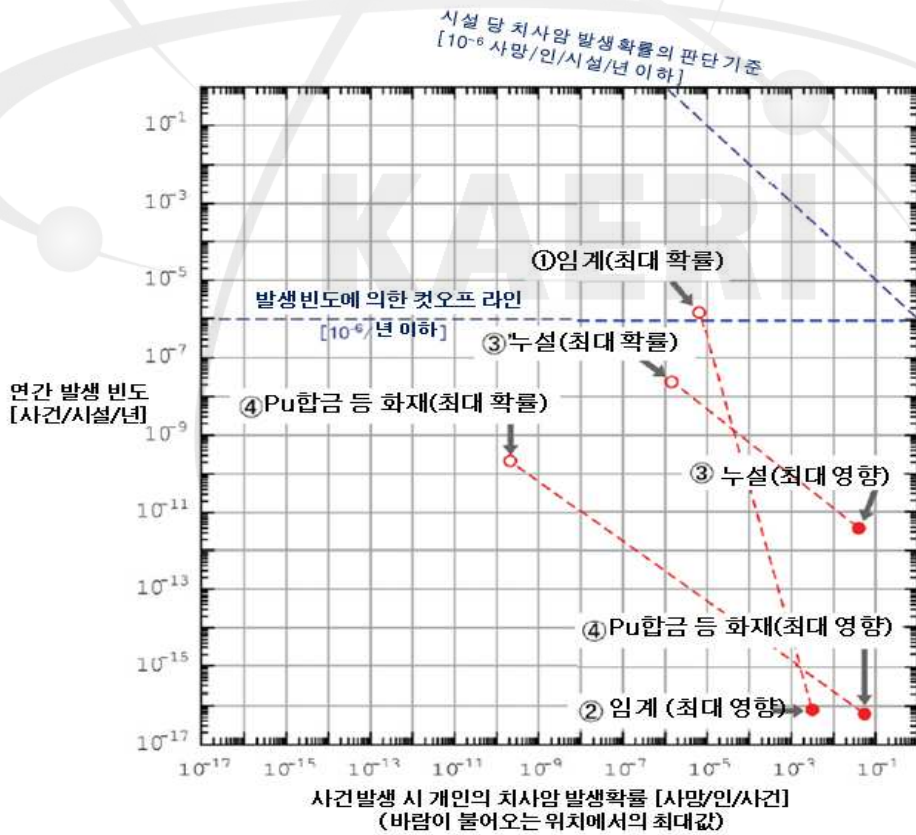


그림 3.38. 금속전해법 시스템에서 일반 공중의 연간 치사암 발생확률 내역 (이상사건의 연간발생빈도와 사건 당 공중의 치사암 발생확률의 관계).

평가치가 높아지는 것은 사출성형조작의 연간 실행횟수가 약 2,000회 (사출성형기 4기 합계)가 넘는 것에 그 원인이 있다. 또한 Ar 셀에서 배기는 모두 기기 오프가스 시스템의 요오드 필터를 통하기 때문에 방사성 요오드의 방출량 저감이 기대되지만 치사암 발생확률에 대해서는 동 사건보다 동시에 방출되는 TRU 핵종의 영향이 더 지배적이다.

「용융염의 누설」은 발생확률이 전해정련조 대수에 영향을 받으므로 플랜트에서의 발생확률은 전해정련조의 대수만큼 증가한다. 본 시스템에서는 5대의 전해정련조가 작동하고 있으므로 해당 사건의 리스크는 5배로 증가한다.

금속전해 시스템에서는 전해정련조에 피폭영향이 큰 Pu나 MA를 다량으로 적재하는 점이나 TRU를 포함하는 금속을 다수 사용하는 등의 리스크 요인이 있는 것과 Ar 셀 냉각 시스템, 기기 오프가스 시스템 및 건물 배기설비라고 하는 영향수지설비가 다층으로 설치되어 있기 때문에 평가로 얻은 리스크 값은 비교적 낮다. 핵적 반응도가 높은 물질을 핸들링 할 때 우려되는 과잉 장전에 의한 임계에 대해서도 본 검토로 나타낸 고도로 자동화된 공정제어 시스템으로 발생빈도를 충분히 낮출 수 있다고 판단된다.

(다) 향후 과제

결정론적 안전성 평가와 마찬가지로 평가의 구도를 확보하기 위해서는 액체 Cd나 용융염의 누설 등으로 방사성물질의 대기 이행률이라는 기본적인 자료를 취득할 필요가 있다. 또한 임계안전상 중요한 역할을 담당하는 공정제어 시스템의 구체화나 그러한 시스템에 있어서 고장 확률의 평가 등도 과제로 남았다. 주요 MS 기능은 간접 배기방식인 비순환 배기방식과 비교하여 방사성물질의 방출 경로에 설치되는 HEPA 필터의 단수가 많고 설계 풍량이 저풍량이기 때문에 에어로졸 발생을 동반하는 사건에서 기기 오프가스 시스템 필터의 건전성을 기대하는 것은 어렵고, 건물 배기 시스템과의 접속방법이나 긴급 시 배기방식에 대한 보다 폭넓게 검토할 필요가 있다.

제 4 장 경제성

제 1 절 건설비

건설비는 각 시스템 설계 결과로 검토된 물량(각 설비의 기기 사양 및 대수, 건물 체적 등)에 대한 비용을 평가하고 이를 적산하여 산출한다.

1. 건설비 적산 범위

- 사용후핵연료 저장시설
- 전해처리·연료 제조 일체화 시설 내 전해처리 범위 (전해처리와 연료 제조의 분기점 : 음극처리까지)
- 폐기물 처리 저장 시설 내 전해처리 범위
- 배기탑 내 전해처리 범위

각 적산 대상물은 각 시설 내에 설치되는 기기에 소요되는 비용인 설비비(기기 관련 비용)와 건물에 부수 하는 환기 설비·전기 설비·건물 자체 및 라이닝에 소요되는 비용인 건물비를 개별적으로 적산한다. 이것은 라이프 사이클 비용에 영향을 주는 감가상각 연수가 서로 다르기 때문이다.

2. 설비비

- 주요 프로세스 설비 : 전해처리·연료 제조에 직접 관련된 공정을 포함한 설비
- 폐기물 처리·저장 설비 : 폐기물 처리·저장에 관련된 공정을 포함한 설비
- 연료 저장 설비 : 사용후핵연료·신연료 집합체 저장에 관련된 공

정을 포함한 설비

- 분석 설비 : 분석에 관련된 공정을 포함한 설비
- 유틸리티 설비 : 시약·증기, 유틸리티에 관련된 공정을 포함한 설비
- 계장제어 설비 : 운전 관리 시 계측·제어계에 관련된 설비
- 비상발전 설비 : 비상용 전원 공급에 관련된 공정을 포함한 설비
- 그 외 설비: 상기에 포함되지 않는 설비

또한 설비비의 적산 대상은 기기비(공장 제작에 소요되는 비용), 설계비, 공사·검사비(공장 출하부터 현지 작업에 소요되는 비용), 관리 경비로 구성된다.

3. 건물비

건물비는 건물 체적과 체적 단가를 이용하여 산출한다. 체적 단가는 기존의 원자력 시설을 참고로 하여, 13 만엔/m³ 으로 한다.

4. 평가 대상 외

본 검토에서는 아래의 비용은 평가 대상에서 제외하였다.

- 부지 취득에 관한 비용(토지대, 조성비용, 도로 항만 정비, 보상 등)
- 폐기물의 수송 및 처분비
- 연구 개발에 관한 비용(개발비, 시작비 등)
- 예비비(contingency)에 관한 비용

설비비용의 적산대상을 표 4.1에 나타냈다. 기기비에서 설계비, 설치비, 프로젝트 관리비, 일반 관리비를 산출한 다음 전부 더하여 설비비를 산출한다. 적산의 기본이 되는 기기비에 대해서는 각 시스템 설계 담당 제조사의 평가값을 사용한다.

표 4.1. 설비비의 적산대상

기기비 (가공비, 재료비, 검사비)	설계비	설치비	프로젝트 관리비	일반관리비
(a)	(a)×20 %	(b)×30 %	(c)×10 %	(d)×10 %
(b)				
(c)				
(d)				

건설비의 평가결과는 그림 4.1에 나타냈다. 설비비는 1,040억엔, 건설비는 300억엔으로 합계 1,340억엔으로 평가되었다.

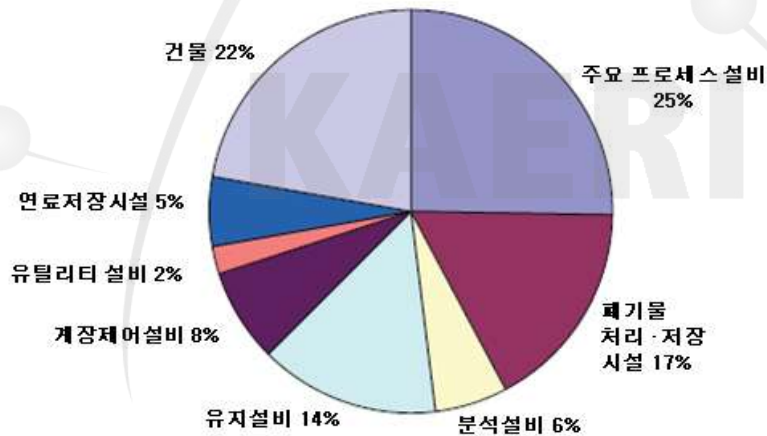


그림 4.1. 건설비 내역.

제 2 절 연간 운전 경비

연간 운전 경비는 전해처리 기술의 시스템 설계 결과를 바탕으로 아래에 나타난 비용을 평가하여 산출한다.

- 인건비 : 조업에 필요한 인원과 관련 비용
- 기기 교환비 : 점검 시 기기 교환과 관련 비용
- 정기 검사비 : 점검 시 임시로 필요한 인원 및 점검 작업에 필요한 기기와 관련 비용
- 소모품 등 : 조업에 필요한 유틸리티·소모품 등 관련 비용
- 위탁비 : 위탁 작업에 종사하는 위탁 작업원의 인건비 등 위탁비

연간 운전 경비의 평가 결과를 그림 4.2에 나타냈다. 연간 운전 경비는 96억엔/년으로 평가되었다.

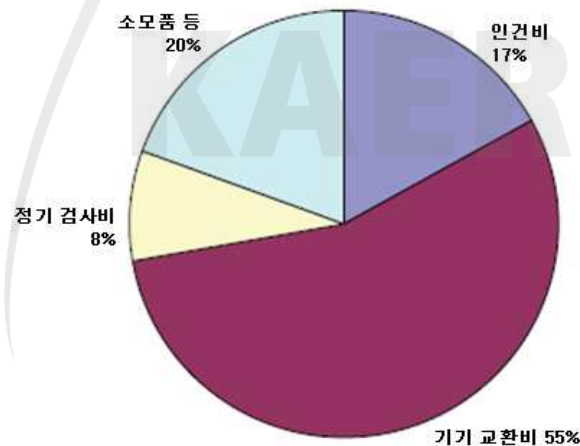


그림 4.2. 연간 운전 경비 내역.

1. 인건비

엔지니어 및 관리 감독자를 44,500 엔/인일, 일반 작업자를 29,900 엔/인일, 엔지니어 및 관리 감독자와 일반 작업자의 비율을 8:2로 하여 1,039.5 만 엔/인년으로 설정하였다. 필요 인원의 적산 범위는 아래와 같다.

- 관리직 : 관리·감독 인원 및 당직자. 기본적으로 주간 근무이며, 교대는 3 교대제(5조).
- 운전 필요 인원 : 공정마다 운전에 직접 종사하는 인원. 주간 및 3 교대제.
- 폐기물 처리 저장 필요 인원 : 폐기물 처리 저장 업무에 종사하는 인원. 주간 및 3 교대제.
- 분석 필요 인원 : 분석 업무에 종사하는 인원. 주간 및 3 교대제.
- 기술·보수 필요 인원 : 평상시의 전기·기계 보수 점검 업무 등에 종사하는 인원. 주간 근무.
- 방사선 관리 필요 인원 : 방사선 피폭 관리 업무에 종사하는 인원. 주간 및 3 교대제.
- 환경 관리과 : 환경 보안 업무에 종사하는 인원. 주간 근무.
- 핵물질 관리과 : 핵물질 관리 업무에 종사하는 인원. 주간 근무.
- 품질 보증과 : 품질 보증 업무에 종사하는 인원. 주간 근무.
- 관리과 : 사무 업무에 종사하는 인원.

전처리시설 내, 인수, 해체, 전단가공, 폐기물처리조 내의 고준위폐기물 고화, 고체폐기물처리, 액체 폐기물처리공정 및 보수는 가동률이 낮기 때문에 주간 작업만하는 것으로 가정한다.

전처리시설 내, Na제거공정, 전해정련설비, 폐기물처리설비, 기체폐기물처리공정 및 분석은 가동률이 높기 때문에 주간 작업 및 5조 3교대제로 가정한다.

고준위 고화체 저장, 고체 폐기체 저장 및 사용후핵연료 저장은 3가지 저장설비의 관리를 1명이 담당하는 체제로 하며, 반출입 조작은 주간 작업만 수행한다고 가정한다.

관리직, 환경관리, 핵물질관리, 품질보증 등은 토카이 재처리시설의 경험을 근거로 합리화하여 총 설비요원의 약 20 %로 가정한다.

이러한 작업자는 각 처리장치나 물질 취급의 자동화를 가정하여 공학적 판단으로 평가하였다. 평가한 결과는 표 4.2에 나타냈다.

2. 기기 교환비

기기 교환은 통상적으로 기기의 수명에 맞춰 실시하며, 기기 교환 시점에서 기기 교환비가 발생한다. 본 검토에서는 이것을 연평균으로 산출하였다. 기기 교환대상은 설비비 및 건물비로 한다. 기기의 교환 빈도는 원칙적으로 아래와 같은 기준에 따라서 적산한다.

- 부식 등 극한 환경의 공정에서 사용하는 기기 : 기기비의 6 %
- 물질 취급 등 동적 조작 공정에서 사용하는 기기 : 기기비의 6 %
- 정적 조작 공정에서 사용하는 기기 : 기기비의 3 %
- 유지보수의 필요성이 낮은 기기 : 기기비의 3 %
- 건물 : 기기비의 1 %
- 유지보수가 불필요한 기기 : 없음

표 4.3에 설비 마다 가정한 교환빈도를 나타냈다.

3. 정기 검사비

정기 검사 시 인건비를 대상으로 하며 가설비 등은 기기 교환비에 포함된다고 가정한다. 인건비 단가는 10 만엔/인·일로 가정한다. 또한 정기 검사 기간은 비운전일인 165일(=365일-200일)의 약 반인 80일로 가정한다. 검사 인원에 대해서는 50 tHM/yr플랜트로 100명/일로, 처리 규모에 비례하여 증가한다고 가정한다.

표 4.2. 운전관련인원

설비	공정	주간	교대*	합계	전해처리 부담비율
전처리	인수	2	0	2	1
	해체	2	0	2	1
	전단	2	0	2	1
	제거	1	5	6	1
전해정련	시약조정	1	5	6	1
	전해처리	2	10	12	1
	폐염처리	1	5	6	1
	음극처리	1	5	6	1
고준위 폐기물	고화	1	0	1	1
고체 폐기물처리	hull압축	1	0	1	1
	HLW처리	1	0	1	0.97
	압축	1	0	1	1
	소각	1	0	1	1
	드럼	1	0	1	1
액체 폐기물처리		1	0	1	0.5
기체 폐기물처리		1	5	6	0.9
고준위 고화체 저장		1			1
고체 폐기물저장		1	5	8	0.98
사용후핵연료 저장		1			1
분석	샘플	1	5	6	0.64
	전처리	5	25	30	0.64
	분석	2	10	12	0.64
보수		30	0	30	0.67
방사선 관리		2	25	27	0.67
관리직, 관리과, 품질보증과, 핵물질관리과, 환경관리과				34	상기 총 인원의 20 %
합 계				202	

* 교대는 5조 3교대제

4. 소모품 등

소모품 등의 적산 범위는 아래와 같다.

- 유틸리티 (전기·수도 등)
- 시약류
- 보충 우라늄 등
- 교환 빈도가 1년 이내의 기기·부품 (전단칼, 도가니 등)
- 사무용품 등

유틸리티, 시약류, 보충 우라늄, 교환 빈도가 1년 이내의 기기·부품의 비용은 프로세스마다 사용량을 평가하여 산출한다. 소모품비는 시스템 설계 검토에 의해 설정한 연간 유틸리티, 가스, 시약류, 소모품의 사용량으로 평가한 비용과 사무용품 등의 비용을 토대로 산출하였다. 주요 소모품은 표 4.3에 나타냈다.

5. 위탁비

위탁비의 적산 범위는 아래와 같다.

- 경비비 : 주변 감시 구역, 보전 구역, 관리 구역 경비원의 인건비.
- 청소비 : 시설 내 화이트와 그린 구역의 청소를 실시하는 인원의 인건비.
- 세탁비 : 작업복 등 세탁에 소요되는 비용. 외주 위탁. 인건비에 상당하여 평가한다.

각 비용에 대해서는 토카이 사업소에서의 실적을 고려하여 공학적 판단으로 설정한다.

표 4.3. 각 설비마다 가정한 교환빈도

구분	공정	교환빈도 (%)			
		기기	배관·가대	전기계장	이송
주요과정	인수	3	3	3	6
	해체	6	3	3	6
	전단·	6	3	3	6
	시약조성	3	3	3	3
	전해처리	6	3	3	6
	음극처리	6	3	3	6
	폐염처리	6	3	3	6
폐기물처리	유리고화	6	3	3	6
	인공과물고화	6	3	3	6
	HASW처리	6	3	3	6
	LASW처리	6	3	3	6
	중방사성 액체처리	6	3	3	3
	저방사성 액체처리	6	3	3	3
	극저방사성 액체처리	6	3	3	3
	폐용매처리	6	3	3	3
	오프가스	6	3	3	3
	Ar처리	6	3	3	3
폐기물저장	고준위고화체저장	3	3	3	3
	고체 폐기물저장	3	3	3	3
분석		6	3	3	6
보수	건식처리시설	6	3	3	6
계장제어	건식처리시설	3	3	3	3
유틸리티	증기	3	3	3	3
	냉각수	3	3	3	3
	냉수	3	3	3	3
	용수	3	3	3	3
	압축공기	3	3	3	3
	연료유	3	3	3	3
연료저장	사용후핵연료저장	3	3	3	3
건물					1

표 4.4. 주요 소모품

소모품	사용목적	사용량
유틸리티		
전기	공기조절, 전해조가열 등	4.5×10 ⁷ kWh
가스		
Ar	전해정련셀 등의 분위기관리용	520,000 kg/년
시약		
금속우라늄	전해정련조 추가용	1,100 kg/년
금속지르코늄	드로스 처리용	340 kg/년
금속리튬	염 리사이클시의 HM환원용	400 kg/년
칼륨	염 리사이클시의 HM환원용	1,700 kg/년
LiCl	용융염	1,100 kg/년
KCl	용융염	1,600 kg/년
제올라이트	사용후염의 FP흡착용	26,000 kg/년
에탄올		71,000 kg/년

제 3 절 전해처리 단가 · 연료 사이클 비용

사용후핵연료를 전해처리하여 전해처리 제품 1 kgHM를 제조하는데 소요되는 비용을 전해처리 단가라고 정의하였다. 전해처리 단가는 자본비와 조업비로 구성되어 있으며 전해처리 시설의 건설에서부터 폐지 조치까지의 라이프 사이클 비용을 산출하여 이것을 플랜트 운전 기간으로 나눈 평균치로 산출한다.

건설비 · 연간 운전 경비의 결과를 바탕으로 산출된, 건식처리단가는 53.9 만엔/kgHM (자본비 23.2 만엔/kgHM, 작업비 30.0 만엔/kgHM)으로 산출되었다. 산출한 건식처리단가, 연료의 연소도 : 94GWd/tHM, 발전효율 : 42.5 % 및 소내 부하율 : 4.39 %를 이용하여 연료 사이클 비 (건식처리 분)를 산출하였다. 연료 사이클 비 (전해처리 분)는 0.58 엔/kWh로 산출되었다.

1. 자본비

자본비를 구성하는 비용은 모두 건설비를 기본으로 산출한다. 다만 건설비에는 소유자 비용(공사 전체의 프로젝트 관리비, 인허가 조성비 등, 플랜트 소유자가 지불하는 비용)으로 위 건설비에 10 %를 더한 값을 적용한다. 자본비를 구성하는 비용은 아래와 같다.

- 감가상각비 : 전해처리 시설의 감가상각에 소요되는 비용. 건물, 설비의 상각 기간, 상각 방법, 잔존 가격 비율을 이용해 산출한다.
- 사업 보수 : 사업이 건전하게 전개할 수 있기 위한비용을 사업 보수로 고려하여 사업 보수율로 산출한다.
- 고정 자산세 : 시설의 고정 자산세이며, 고정 자산세율을 이용해 산출한다.
- 폐지 조치비 : 전해처리 시설의 해체비와 해체 폐기물의 처리 처분비이며 설계 정보로 비용을 평가하고 적립 방법, 적립 기간, 적립이율을 이용해 산출한다.

2. 조업비

조업비를 구성하는 비용은 주로 연간 운전 경비를 건식처리제품 1 kgHM으로 환산한 것이다. 조업비를 구성하는 비용은 아래와 같다.

- 인건비 : 연간 운전경비의 인건비가 대상이다.
- 수리비 : 연간 운전경비의 기기 교환비 및 정기 검사비가 대상이다.
- 소모품 등 : 연간 운전 경비의 소모품등 비 및 위탁비가 대상이다.
- 업무 분담비 : 직접비(인건비+수리비+소모품 등)로부터, 업무 분담비율(15%)을 이용해 산출한다.
- 사업세 : 외형 기준 할당액이 대상이다.

3. 연료 사이클비 (건식처리비)의 적산

건식처리 단가 평가 결과를 바탕으로 대상이 되는 노특성 데이터를 이용하여 건식처리비 (엔/kWh)를 산출한다.

KAERI

참고 문헌

- [1] 「용융염 전해정련조에 의한 Pu회수기술 개발 -액체 Cd 음극에서의 Pu 거동-」, 전중연보고, 연구보고 T99078, 2000-6
- [2] 「전해정련조에 의한 우라늄, 플루토늄 회수기술의 개발 -액체 카드뮴 음극으로의 동시 회수 시 우라늄, 플루토늄의 전해거동-」, 전중연 연구보고, T02004, 2003-1
- [3] K. Uozumi, M. Iizuka, T. Kato, T. Inoue, O. Shirai, T. Iwai, Y. Arai, “Electrochemical behaviors of uranium and plutonium at simultaneous recoveries into liquid cadmium cathodes”, J. Nucl. Mater. 325(2004)34.
- [4] T. Kato, K.Uozumi, T.Inoue, O. Shirai, T. Iwai, Y. Arai, “Recovery of Plutonium and Uranium into Liquid Cadmium Cathodes at High Current Densities”, Proc. of GLOBAL 2003, New Orleans, LA, Nov. 16-20, 2003.
- [5] 「액체 카드뮴 음극으로의 우라늄, 플루토늄의 동시 회수 시험(IV)」, 일본원자력학회 2003년 춘계학회, N42, 2003-3
- [6] 「희토류 원소가 공존하는 용융염에서의 액체 Cd 음극으로 U, Pu회수」, 일본원자력학회 2005년 춘계학회, N3, 2005-3
- [7] 2004년도 문부과학성 혁신적 원자력 시스템 기술 개발 공모 사업 금속핵연료의 건식재처리 프로세스의 합리화에 관한 기술개발 성과 보고서
- [8] 2004년도 문부과학성 혁신적 원자력 시스템 기술개발 공모사업 「금속핵연료의 건식 재처리 프로세스의 합리화에 관한 기술개발」 성과보고서
- [9] JAEA-Research 2006-043 “Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems Technical Study Report of Phase II”

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/TR-4110/2010					
제목 / 부제		일본의 고속로 금속핵연료 전해처리시설 개념연구			
연구책임자 및 부서명		고원일(국제전략연구부)			
연구자 및 부서명		이호희(국제전략연구부), 고원일(국제전략연구부), 권은하(국제전략연구부), 박병홍(국제전략연구부) 서중석(핵연료주기시스템공학기술개발부), 김민영(국제전략연구부)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년도	2010년
페이지	116p	도표	있음(0), 없음()	크기	A4
참고사항					
공개여부	공개(0), 비공개()		보고서종류	기술보고서	
비밀여부	대외비 (), _ 급비밀				
연구위탁기관			계약 번호		
초록 (15-20줄내외)					
<p>지속가능한 원자력에너지의 이용을 위해서는 사용후핵연료의 재활용이 필연적이며, 파이로기술은 사용후핵연료를 고온 용융염 상에서 금속으로 전환하여 핵연료의 부피, 발열량 및 방사선의 세기를 감축하여 처분 경제성을 획기적으로 높이고 이를 SFR 핵연료주기에 활용함으로써 사용후핵연료의 관리문제를 근본적으로 해결할 수 있는 핵비확산성 기술로 알려져 있다. 한국원자력연구원은 1997년부터 원자력중장기사업의 일환으로 경제성, 안전성 및 핵비확산성이 강화된 핵연료주기 기술인 파이로 기술을 개발해 오고 있다. 일본은 2005년에 “고속로사이클 실용화 전략 조사연구” Phase II를 완료하고, 2006년부터 후속 프로젝트인 FaCT(Fast Reactor Cycle Technology)에 본격적으로 착수하였다. 본 보고서는 Phase II에서 수행한 내용 중 금속핵연료 파이로 처리기술을 이용한 시설의 중요내용을 발췌하여 향후 국내에서 유사한 시설의 예비개념설계를 수행하는데 참고 자료로 활용하고자 한다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		사용후핵연료, 재활용, 파이로기술, 예비개념, 전해처리, 금속핵연료			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-4110/2010							
Title / Subtitle		Conceptual Design Study on Electrorefining Processing Facility for SFR Metal Fuels in Japan					
Project Manager and Department		Won-Il Ko (Nuclear Fuel Cycle Development Research Division)					
Researcher and Department		Ho-Hee Lee, Won-Il Ko, Eun-Ha Kwon, Byung-Hung Park, Chung-Suk Seo, Min-Young Kim					
Publication Place		Daejeon		Publisher		Publication Date	
						2010. 8	
Page		116p.		Ill. & Tab.		Yes(0), No ()	
						Size	
						A4	
Note							
Open		Open(0), Closed()		Report Type		state of the art report	
Classified		Restricted(), ___Class Document					
Sponsoring Org.				Contract No.		-	
Abstract (15-20 Lines)							
		<p>The sustainable utilization of nuclear energy requires reuse of the spent fuels. Pyroprocessing is known as a technology appropriate to resolve the spent fuel management issue while possessing non-proliferation aspect by converting the spent fuels into a metal form in a high temperature molten salt phase and, as a consequence, reducing the volume, heat load, and radioactivity to increase economics on disposal and/or to be applicable into a SFR nuclear fuel cycle. KAERI has developed the pyroprocessing with increased economics, security, and non-proliferation from 1997 as a long-term nuclear project. Japan completed Phase II on "Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems" in 2005 and started FaCT(Fast Reactor Cycle Technology) from 2006 as a following project. The essential contents of the result from Phase II was selectively introduced in this report to be used as a reference for a preliminary conceptual design of a similar facility to be built in the future.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		spent nuclear fuel, pyroprocessing, metal fuel, preliminary conceptual design, high temperature molten salt phase					