2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대 관리공정의 MBA 및 KMP 설정 개념분석

The Conceptual Analysis of MBA & KMP for Advanced Spent Fuel Management Process

구대서, 이상윤, 고원일, 하장호, 김호동, 석호천
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고온 LiCl 용융염 공정을 통한 사용후 핵연료의 금속전환 특성에 대한 핵확산 저항성을 분석하고, 핵물질 안전조치 적용 방안을 제시하였다. 금속 전환체 연구를 위한 핵물질 안전조치 방안의 MBA와 KMP의 개념을 분석하고 설정하였다. 이 연구는 차세대 핵연료 관리공정의 핵물질 안전조치 방안 설정에 활용될 것으로 기대되며, 향후 국내의 사용후 핵연료 재순환 공정연구의 바탕이 되는 핵물질 안전조치 확립의 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

Abstract

We have analyzed nuclear proliferation resistance of uranium dioxide metallic conversion with LiCl molten salt process of high temperature and proposed the application method of nuclear material safeguards to spent fuel metallic conversion. We have performed conceptual analysis and establishment of MBA & KMP for nuclear material safeguards in order to accomplish metallic conversion research of molten salt of uranium dioxide fuels. This research will contribute to the implementation of nuclear material safeguards of advanced spent fuel management process, and also to the usage of basic data of nuclear material safeguards for spent fuel recycling process of native country.

1. 서론

사용후핵연료 차세대관리공정은 LiCl 용융염 계에서 산화물 핵연료를 Li 금속으로 환원하는 금속전환공정을 근간으로 하는 공정으로서, 이 금속전환과정에서는 알칼리, 알칼리토금속 및 일부 RE 원소를 제외한 모든 핵분열생성물과 우라늄, 플루토늄 등이 금속으로 전환되는 특성을 가지고 있다[1-5]. 이러한 고온 LiCl 용융염 계에서의 산화물 핵연료의 금속전환특성과 일부 핵분열생성물의 선택적 분리성은, 고준위폐기물인 사용후핵연료의 부피 감용 이외에 방사능 및 발열량을 획기적으로 감소시킬 수 있는 부가적인 장점을 제공

한다[6-8]. 이와 같은 관점에서 고온 LiCl 용융염계에서 산화물 핵연료를 금속 전환하여 저장·관리할 경우, 사용후핵연료 저장시설의 저장성 향상은 물론 저장 안전성 요건의 완화 측면에서 매우 바람직할 것으로 예상되고 있다[9].

본 연구에서는 고온 LiCl 용융염 공정을 통한 사용후핵연료의 금속전환 특성을 고려하여 차세대 핵연료관리공정의 핵확산저항성을 분석하였으며, 핵물질 안전조치 적용 방안을 제시하였다. 용융염을 이용한 금속전환체 연구의 원활한 진행에 있어서 필수불가결의 핵심사항인 핵물질 안전조치 방안 설정을 위해 MBA 및 KMP 개념을 분석하였다. 또한 MBA 및 KMP 설정하고 차세대관리공정의 물질 수지 특성을 분석하였다. 이 연구는 차세대 핵연료관리공정의 핵물질 안전조치 방안 설정을 위해 활용될 수 있을 것으로 예상되며, 향후 국내의 사용후핵연료 재순환 공정연구의 바탕이 되는 핵물질 안전조치 확립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 핵물질 안전조치 개념분석

2.1. 핵물질 안전조치의 기술적 목표

IAEA에 의한 핵물질 안전조치의 목적은 핵물질을 평화적인 원자력활동 이외의 목적에 전용하지 않는다는 것을 국제사회에 보장하는 것이다. 이것을 기술적으로 달성하기 위해, 전용이 발생하는 경우를 대비하여 이것을 높은 확률로 탐지할 수 있는 안전조치 접근방안을 설계하며 실제로 운용하여 안전조치의 목적을 달성한다. 즉, 국제적인 핵물질 안전조치의 중심 역할은「검증제도」에 있으며, IAEA가 실시하는 검증이란 협정 체결국인 각각의 비 핵 국가가 원자력의 평화적 이용에 관한 국제약속을 준수하고 있다는 것을 보증하는 것이다. 따라서, IAEA에게는 모든 가입국에 대해 중립적인 국제감시의 역할을 수행하도록 요구되며, 이 감시는 객관적이고 공평해야 한다. 이러한 IAEA에 의한 검증활동에 있어서의 구체적인 목표를 부여하는 것이 「기술적 목표」이다.

이것과 관련된 탐지목표개념에서 IAEA 안전조치의 기술적 목표는 다음과 같이 정의될 수 있다. 즉, “유의량의 핵물질이 평화적인 원자력 활동에서 핵무기 및 그 밖의 핵폭발 장치의 제조를 위해 또는 불명확한 목적을 위해 전용되는 것을 적시에 탐지하는 것” 이다. 이와 같은 탐지 목표는 다양한 수학적인 인자 (유의량, 탐지시간, 탐지확률)들과 오경보율로 알려지는 또 다른 인자로 구성된다. 이들 인자는 단순히 물리적·기술적인 개념에서 도출된 것이 아니며, 기술적·정치적 판단 및 협의에 근거하여 타당한 수치가 선정되고 있다.

탐지 목표 설정에 관련된 개념은 임계량(threshold amount), 전용시간(conversion time), 전용전략(conversion strategy) 등과 같은 기본적인 기술적 인자를 의미한다. 표 1은 특수 핵분열성 물질의 임계량 그리고 표 2는 Pu 또는 U 금속구성요소 완성을 위한 추정 전용시간을 나타낸다. 이러한 인자들은 안전조치 하에 있는 핵물질로부터의 핵폭발장치의 잠재적인 제조능력과 관련되어 있으며, IAEA

탐지목표를 설정하는 시작점으로 이용된다. 외부인자에 포함되어 있는 각각의 기술적 인자는 다음과 같이 정의된다. 탐지 목표는 이상과 같은 외부 인자를 적용하여 IAEA의 안전조치 접근방안을 설계할 때의 목표로 설정 되며, 이것은 안전조치 접근방안의 검토 및 사찰 목표 설정시의 가이드라인으로 이용되는 것으로서 외부인자를 실제적인 정량치로 나타내는 것이다. 이러한 탐지 목표는 유의량 (SQ-Significant Quantity), 탐지시간 (DT-Detection Time) 및 탐지확률 (DP-Detection Probability) 등의 인자로 구성된다. 표 3은 핵물질의 유의량을 나타낸다.

2.2. 핵물질 안전조치 접근 방안

핵물질 안전조치 접근방안이란 특정한 상황 하에서 안전조치의 실시를 위해 선택된 핵물질의 계량관리, 격납/감시 및 그 밖의 조치 등으로 이루어지는 시스템을 의미한다. 즉, 원자로, 재처리, 전환, 가공, 농축 등 핵연료주기 시설의 안전조치 목적을 달성하기 위한 시스템을 총칭하는 개념이다. 안전조치 접근방안을 설계함에 있어서 IAEA는 그림 1에 도시된 것과 같은 안전조치 접근방안의 설계요인 및 설계절차를 채택하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 안전조치 접근방안은 탐지목표를 지침으로 이용하여 동일한 사찰목표 및 절차를 도출해 내는 것으로서, 안전조치 접근방안을 설계할 때에는 설계정보, 시설업무, 국가제도의 활용, 전용가정, 안전조치 접근 방안, 기술적 능력, 인증같은 요소들을 고려해야 한다.

모델 안전조치 및 시설 안전조치 접근 방안, 주어진 상황에서 안전조치의 이행을 위해 선택된 핵물질 계량관리, 격납 및 감시, 특정 상황과 관련된 안전조치의 목적을 만족시키기 위해 개발된 시스템이 안전조치 접근 방안이다. 안전조치 접근방안은 원자력 시설에서의 각 유형에 따라 설계되는 모델 안전조치 접근 방안과, 특정 시설의 안전조치 이행을 위해 모델 안전조치 접근 방안을 변형시켜 적용하는 시설 안전조치 접근 방안으로 구별될 수 있다.

2.3. 안전조치 접근방안으로서의 계량관리

핵물질의 계량관리는 물질보존의 원리에 근거하고 있다. 즉, '어느 구역에 존재하는 어느 물질의 재고량 변화는 그 물질의 [구역 내에서의 정량의 생성 또는 손실]과 [그 구역 밖에서 안으로의 유입]의 합계에서 [그 구역 밖으로의 유출]을 뺀 것과 같아야 한다'는 것이다. 이러한 원리에 근거하여 효과적인 검증을 실시하기 위해서는 핵물질의 이동과 재고에 관한 지식이 필요하며, 이를 통해 핵물질에 대한 물질수지를 주기적으로 구해야 한다.

이러한 물질보존의 원리를 핵연료 시설에 적용하기 위해서는 적합한 구역이 설정되어야 하며, 이를 물질수지구역 (MBA-Material Balance Area)라 한다. 구역설정에 있어서는 원자력 시설의 기술적 측면에서의 특성을 고려하여, 경계를 넘는 모든 핵물질의 이동 측정 및

MBA 내의 재고량 확정이 용이하게 이루어질 수 있도록 구역경계가 설정된다. 측정은 어느 중요 전략 지점 (SP-Strategic Point)에서 이루어지는데, 이와 같은 지점을 주요측정지점 (KMP-Key Measurement Point)라 한다. 이 지점은 핵물질의 이동과 재고에 관한 정보가 수집되어 검증을 가능하게 하는 장소이며 핵물질이 측정되는 형태로 나타나는 장소이다.

핵물질에 관한 계량관리의 1 주기는 시설자가 실시한 MBA의 실재고 확정과 IAEA의 검증으로 시작된다. 시설자는 초기재고를 기초로 하여, 여기에 증가량(반입량)을 더하고 감소량(반출량)을 빼면서 장부 재고를 유지한다. 이 계량관리 주기는 시설자가 설정한 물질수지기간 종류수의 실재고 측정과 물질수지의 평가에 의해서 종료된다. 또한, 이러한 모든 자료들은 IAEA에 의해 검증된다.

시설에서 채취된 핵물질 시료의 분석은 검증 과정에서 매우 중요한 부분을 구성한다. 어느 종류의 분석은 검사대상 품목에 물리적으로 영향을 주지 않는 상태에서 사찰 중에 실시되며, 통상 비파괴 분석 기술을 이용한다. 또한, 시료에 따라서는 화학분석과 그 밖의 파괴적 기술에 의해서 측정되는 경우도 있으며, 이러한 분석은 IAEA 안전조치분석소 (SAL-Safeguards Analytical Lab.)에서 이루어진다.

핵물질을 내장하는 확인 가능한 품목(핵연료집합체 및 봉인된 격납용기)을 취급하는 시설 (품목계수 시설)에서는 핵물질 계량기간 중 품목은 변하지 않고 완전성을 유지하고 있다고 간주되므로, 최신의 장부재고와 최종적 실재고 사이에 차이가 없으면 정상으로 간주된다. 봉인되지 않은 중량계수 상태 (분말, 펠릿, 용액, 스크랩 등)의 핵물질을 취급하는 시설 (중량계수 시설)에서는 측정 정밀도에 불가피한 한계가 있으므로, 장부재고와 실재고 사이에는 일정한 차이가 나타난다. 이러한 차이의 원인으로는 측정오차 외에 재고 중 일부의 서툰 측정, 측정되지 않은 손실이나 전용 등이 있을 수 있다. 장부재고와 실재고의 차이는 재고차 (MUF)로 나타나며, MUF는 측정에 의해 구해진 양이므로 전용의 가능성을 평가할 때의 지표로 이용되기도 한다.

MUF의 정의는 '장부재고와 실재고의 차이'이며 미국에서는 BPID(Book Physical Inventory Difference) 또는 ID(Inventory Difference)의 용어를 사용하고 있다. MUF는 다음의 (1) 식으로 표현된다.

$$MUF = PB + X - Y + PE \quad \text{----------(1)}$$

여기서,

PB = 기간 J에 대한 초기 실재고,

X = 재고 증가분의 합계,

Y = 재고 감소분의 합계,

PE = 기간 J에 대한 말기 실재고, 기간 J+1에 대한 초기 재고이다.

이 공식은 증가가 유입 측에 의해 측정된다고 가정한 것이며, 만약 증가가 유출 측의 수치에 근거하고 있다면 대체공식은 (2)식과 같이 된다.

$$MUF = PB + S + SRD - Y - PE \quad \text{----------(2)}$$

여기서,

S = 유출측 수치의 합계,

SRD = 유입/유출간 차이의 합계 (S-X) 이다.

핵물질의 계량에는 계량오차를 동반하기 때문에 MUF는 일반적으로 (+)와 (-) 중의 어느 범위 내에서 변동되며, 평균치는 0이 되고 이것을 실제의 MUF 기대치는 0 이라고 표현하기도 한다. 또한, +/-로 바뀌는 폭의 표준적 크기를 통계학에서는 MUF의 표준편차라고 하며, σ_{MUF}로 표시하기도 하며 계량오차로 인하여 발생한 MUF의 관측치 MUF_0는 $\pm\sigma_{MUF}$ 표준편차의 범위 내에 있다고 할 수 있다. 다만, 계량오차 이외의 원인이 MUF 발생 원인에 들어가게 되면 상황이 달라지게 되며, MUF 관측치는 그 원인을 반영한 형태로 나타나게 된다.

MUF 평가란 이러한 원인이 MUF 관측치에 나타나지 않는지에 대한 여부를 통계방법을 통해 평가하는 것으로서, 몇 가지의 비정상적인(측정오차 제외) 원인이 존재한다고 판단되면, 원인 규명을 위한 정보를 MUF 관측치와 그것을 도출해 낸 그 밖의 기록 자료를 이용하여 찾아내는 행위를 말한다.

3. 차세대관리공정의 MBA 및 공정내 KMP 설계

3.1. MBA간 핵물질 이동 타당성 조사

IAEA의 안전조치에서는 [시설], [국내체제], [IAEA]의 각 단계에서 핵물질의 계량관리를 실시할 것을 요구하고 있다. 이중 [시설] 단계의 계량관리활동에 있어서는 아래와 같은 작업을 실시하도록 요청하고 있다.

- 핵물질의 취급을 물질수지구역(Material Balance Areas ; MBAs)으로 구분하는 일.
- 각 MBA에 보관 · 유지될 핵물질량을 기록하고 보관하는 일
- 어느 MBA로부터 다른 MBA로의 핵물질의 이전(국제간 또는 국내간)을 포함하는 처리, 또는 핵적 생성 또는 핵적 손실에 따르는 핵물질의 존재량 변화를 전부 측정하고, 기록하는 일
- 재고를 확인함에 따라, 각 MBA에 존재하는 핵물질의 양을 정기적으로 측정 · 기록하는 일

- 특정 MBA 기간에서 물질수지를 닫고, 또한 해당 기간에 대한 미계량 물질량(Material Unaccounted For ; MUF)을 계산하는 일

- 측정 및 교정의 정확성, 아울러 source 데이터 및 batch 데이터의 기록의 정확성을 결정하기 위한 측정관리 계획을 규정하는 일

- 탐지되지 않는 손실의 지표인 오차 한계에 대해 MUF를 계산하고 검정하는 일

- 기록의 오차, 측정되지 않은 손실, 사고 손실 및 측정되지 않은 재고의 원인과 크기를 결정하기 위한 계량 데이터를 분석하는 일

이상과 같은 계량관리 관련작업을 실시하기 위해서 각 물질수지구역(MBA)의 설정과 MBA 내에서 핵물질의 주요 측정지점(Key Measurement Point; KMP)을 설정하는 일이 필요하게 된다. "물질수지구역" 이란 IAEA의 안전조치 목적상 물질수지가 결정될 수 있도록 시설의 내부 또는 외부의 각 물질수지구역에로 또는 그 외 지역으로의 이전에 있어서 핵물질의 양이 확정될 수 있는 지역을 말하며, 필요한 경우 규정된 절차에 따라 각 물질수지구역에 있어서의 핵물질의 물자재고가 확정될 수 있는 지역을 말한다.

전술한 바와 같이 MBA의 설정을 위해서는 차세대관리공정의 흐름에 대한 상세한 분석과 공정 흐름에 따른 각 시설간의 경로 특성을 분석하여야 한다. 본 연구에서는 차세대관리 공정 개념설계 자료에서의 물질흐름을 기준으로 공정상의 안전조치상 특성을 분석하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 현재의 공정설계에 의하면 차세대관리공정은 크게 4단계로 이루어져 진행된다. 물질흐름은 조사후시험시설(PIEF)에 보관중인 PWR 사용후핵연료에서 시작되며, 핵연료저장조에서 인출된 핵연료봉은 연소도 측정을 위한 gamma scanning 및 rod cutting 작업을 거쳐 rodcut 단위로 포장되어 조사재시험시설(IMEF)로 이송된다. IMEF로 이송된 rodcut은 차세대관리공정을 위해 독립적으로 구축된 핫셀로 이동되며, 이 핫셀은 기능상 air cell 과 argon cell로 구분되어 있다. 핫셀에서의 금속전환 공정이 완료된 금속전환체는 임시 저장되며, 장기적으로는 고준위폐기물 드럼의 형태로 외부 방출될 수 있다.

이상과 같은 차세대관리공정에서의 물질흐름에 따른 MBA 설정에서, 최근의 논의에 의해 DUPIC 공정에서의 scrap을 전달받아 사용하는 흐름이 예상될 수 있다고 판단되며, 이에 따른 MBA 설정을 추가적으로 구성하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 DUPIC 핵연료의 scrap을 전달받아 금속전환공정에 사용하는 경우에는, 기존의 air cell에서의 공정이 DUPIC cell에서 진행되므로 argon cell만 차세대관리공정의 MBA로 설정될 수 있을 것으로 분석되었다. 또한, argon cell의 공간이 협소하여 NDA 측정장비 등의 많은 장치들이 air cell에 위치하여야 하므로 air cell 및 argon cell을 하나의 MBA로 설정하는 것이 효율적일 것으로 판단되었다.

3.2. Flow 및 Inventory KMP 기준 설정

"주요측정지점(KMP)" 은 물질유통 또는 재고목록을 결정하기 위해, 측정될 수 있는 형태로 핵물질이 관리되는 장소를 의미한다. 따라서 주요 측정지점은 물질수지구역에서의 입구, 출구(측정대상 폐기물의 출구를 포함한다) 및 저장 장소를 포함하며, 흐름의 주요측정지점(Flow Key Measurement Point)과 재고의 주요측정지점(Inventory Key Measurement Point)으로 구성된다.

FKMP (Flow KMP) 는 통상의 시설 운전 시에 측정을 위해, 물질수지구역(MBA)내에 정의되어 있는 주요 측정점을 말한다. 또한, IKMP (Inventory KMP)는 실재고 조사를 위해 물질수지 구역 내에 정의되어 있는 주요 측정점을 말한다.

현재까지의 차세대관리공정에서 도출된 금속전환 공정의 물질흐름은 그림 3과 같으며 각 단계별 핵물질 특성은 다음과 같이 분석된다.

① 사용후핵연료 rodcut이 PIEF로부터 RD-15 padirac cask를 이용해 차폐된 상태로 IMEF 핫셀로 반입된다. 핫셀로 반입되는 rodcut은 약 15 20cm 정도의 크기를 가지며 사용후핵연료와 동일한 방사선 특성을 나타낸다.

② 핫셀로 반입된 rodcut은 slitting 및 decladding 작업을 거쳐 pellet 형태 또는 granule 형태로 가공된다. 이 단계에서 핵연료 hull 이 발생되며 declared waste로 처리될 수 있다. UO_2 granule 의 방사선 특성은 변화가 없다.

③ granule 상태의 UO_2는 Voloxidation 단계를 거쳐 U_3O_8 분말로 가공되며 다음 단계를 위해 SS 저장용기에 저장된다. 이 단계에서는 Kr, Xe, I 등과 같은 일부의 휘발성 핵분열생성물이 제거되며 공정 온도는 500℃ 정도로 예상된다.

④ U_3O_8은 금속전환공정을 거치면서 우라늄 granule 형태로 회수되며 전환공정은 argon 분위기에서 진행된다. 평균온도 650℃의 전환공정시에 준 휘발성 핵종(Cs, Ru, Mo)의 일부가 방출되며 금속전환체에는 U, TRU(Pu, Np, Am, Cm) 및 noble metal 이 포함된다.

⑤ 금속전환을 위해 사용된 Li 용융염은 Li 금속 회수단계를 거쳐 금속전환공정으로 재순환(⑥) 된다. Li 용융염에는 알카리/알카리토 금속계열의 염화물이 포함되며, 희토류 계열의 Li 화합물은 RE filtering 단계(⑧)를 거쳐 RE 원소는 폐기물(⑩)로 처리되고 LiCl은 재사용(⑬)되거나 폐기물처리(⑫) 된다.

⑥ granule 형태의 U 금속은 Ingot로 제조된 후(⑨) 고준위폐기물 저장형태로 casting 되며, 이 단계에서 발생되는 scrap은 ingot 단계로 재 순환될 수 있다. 이 단계의 평균온도는 1300℃ 정도로 예상된다. 현재 이 casting 공정은 차세대관리공정의 실증시설에서는 배제하고 있는 상태이며 그림상의 KMP ⑦과 ⑨는 단일 KMP로 설정될 수 있다.

이상과 같은 금속전환공정의 물질흐름 특성 분석에 따라 설정된 차세대관리공정에서의 FKMP 및 IKMP는 그림 4에 제시된 바와 같으며 각 KMP별 핵물질 안전조치 특징은 다음과 같다. 즉, Flow KMP는 그림 4에서 보는바와 같이 KMP-1 KMP-3으로서, KMP-1은 사용후핵연료 절단봉 반입, KMP-2는 우라늄 금속 주괴 반출시 적용되며, KMP-3 는 용융염 및 필터 폐기물 반출 또는 화학분석시료 반출시 적용된다. FKMP의 위치는 차세대관리공정용 핫셀의 rear door가 될 것이며 중성자측정에 의한 NDA 기법과 수량확인 및 중량 측정법으로 계량관리가 가능할 것으로 예상된다. 또한, rear door의 격납감시를 위해 1대의 중성자 모니터와 2대 정도의 감시카메라가 설치되어야 할 것으로 판단된다.

그림 4에서 보는 바와 같이 Inventory KMP는 KMP-A M으로 세분화하여 설정하였으며 각 KMP의 특징은 다음과 같다.

① KMP-A는 핫셀로 반입된 사용후핵연료 rodcut의 핵물질 계량을 위해 적용한다. NDA 방법에 의해 1개의 rodcut의 Cm 함량을 측정하고 이에 따른 Pu와 U의 함량을 추정하며 rodcut 의 수량 확인을 통해 핵물질을 계량 관리한다. 이 KMP는 DUPIC 공정의 scrap을 사용하는 경우에는 생략된다.

② KMP-B는 slitting과 voloxidation 단계를 거친 후 제조된 U_3O_8 granule 의 핵물질 계량을 위해 적용한다. 이 KMP에서는 저장용기를 batch에 따라 구분하여 연소도에 따른 측정오차를 최소화되도록 하는 것이 중요하다. 저장용기내의 granule 총 중량을 측정하고 시료를 채취하여 NDA 방법으로 핵물질 함량을 측정한 후 각 batch 의 총 재고를 도출하며, 필요한 경우 DA 방법을 사용한다. 이 KMP는 DUPIC 공정의 scrap을 사용하는 경우에는 생략된다.

③ KMP-C,H,I,J,K,L은 금속전환공정에 사용된 Li용융염의 핵물질 계량관리에 적용된다. 전술한 바와 같이 U, TRU의 금속전환율이 99.9%에 근접할 것으로 예상되므로 Li 용융염에 잔류하는 SNM의 함량은 NDA 기법에 의한 계량관리 오차 범위 내에 있을 것으로 예상된다. 따라서, 재사용을 위한 각 단계에서의 KMP들은 MUF 량을 최소화하고, 금속전환율이 낮아지는 경우를 대비하여 예비로 설정된 것이다.

④ KMP-D는 granule 상태로 제조된 금속전환체의 핵물질 계량관리에 적용된다. 계량관리오차의 최소화를 위해 금속전환 campaign 당 유사한 연소도의 batch를 이용해 금속 전환하도록 하는 작업이 필요할 것으로 판단되며 계량관리방법은 KMP-B와 동일하다.

⑤ KMP-F 및 KMP-G는 파일럿 또는 상용시설을 대비하여 잠정적으로 설정된 KMP이다. KMP-E 에서는 무작위 샘플 선정에 의한 중량측정과 NDA 측정 및 수량확인에 의해 재고관리가 가능할 것으로 판단되며, 측정오차의 최소화를 위해 연소도 및 중성자증배(neutron multiplicity) 효과의 보정이 필요할 것으로 예상된다.

⑥ KMP-M은 rodcut을 slitting하는 단계에서 발생되는 hull waste 의 핵물질 계량관리를 위해 설정되었다. 이 KMP도 MUF의 량을 최소화 하기 위해 예비로 설정한 것이며 NDA 방법을 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 가급적 decladding ratio를 최대화시켜 rodcut hull에 잔류하는 SNM의 함량을 최소화하는 방안을 강구해야 할 것으로 판단된다.

이상과 같은 차세대관리공정에서의 MBA핵물질 이동 타당성을 조사하였으며, 기존의 air cell에서의 공정이 DUPIC cell에서 진행되므로 argon cell만 차세대관리공정의 MBA로 설정될 수 있을 것으로 분석되었다. 또한, argon cell의 공간이 협소하여 NDA 측정장비 등의 많은 장치들이 air cell에 위치하여야 하므로 air cell 및 argon cell을 하나의 MBA로 설정하는 것이 효율적일 것으로 판단되었다.

또한 금속전환공정의 물질흐름 특성 분석에 따라 FKMP 및 IKMP을 설정하였다. FKMP의 위치는 차세대관리공정용 핫셀의 rear door가 될 것이며 중성자측정에 의한 NDA 방법과 수량확인 및 중량측정법으로 계량관리가 가능할 것으로 예상된다. 또한, rear door의 격납감시를 위해 1대의 중성자 모니터와 2대 정도의 감시카메라가 설치되어야 할 것으로 판단되었다. IKMP는 KMP-A M으로 세분화하여 설정하고 그 특성을 분석하였다.

4. 결론

핵물질 안전조치의 개념을 분석하고 차세대 관리공정에 대한 MBA간 핵물질 이동 타당성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 핵물질 안전조치 접근방안 도출 및 핵물질 계량관리방안에 의한 차세대관리 공정의 핵물질 안전조치 특성을 분석하였다.
2. 차세대 관리공정의 물질수지 흐름 특성을 분석하여 금속전환공정의 MBA 및 KMP 를 설정하고 그 개념을 분석 하였다.
3. 차후 차세대 관리공정의 핵물질 안전조치 적용 방안의 자료로 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구가 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음

참고문헌

[1] M. Benedict et al., "Nuclear Chemical Engineering," MacGraw-Hill, Inc., (1957).

[2] Argonne National Laboratory, "Reactor Fuel Processing-A Review of Recent Development," Vol.

4(1)-Vol. 9(3), (1961-1966).

[3] L. C. Walters, et al., "Performance of Metallic Fuels and Blankets in Liquid-Metal Fast Breeder Reactors," Nucl. Tech., Vol. 65, PP. 179-230(1984).

[4] T. Koyama, et al., "Distribution of Actinides between Molten Chloride Salt/ Cadmium Metal Systems," J. Alloys and Compounds, Vol. 189, No. 1, 34-44(1992).

[5] M. Tokiwai, et al., "Molten Salt Electrorefining of Metallic Fuel-I," Extended Abstracts of Fall Meeting of the American Electrochemical Society, Vol. 91, No. 2, 279(1991).

[6] D. R. Olander and A. D. Pasternak, "Mass Transfer and Transport Properties in Fused Salt and Liquid Systems," Proceedings of Nuclear Fuels, Nuclear Metallurgy, Vol. 15, 467(1969).

[7] M. Sakata, et al., "Equilibrium Distribution of Rare Earth Elements between Molten LiCl-KCl Eutectic Salt and Liquid Cadmium," J. Nucl. Mater., Vol. 185, PP. 56-65(1991).

[8] M. A. Lewis and T. R. Johnson, "A Study of the Thermodynamic and Reducing Properties of Lithium in Cadmium at 773K," J. Electrochemical Soc., Vol. 137(5), PP. 1414-1418(1990).

[9] T. R. Johnson et al., "Process to Separate Transuranic Elements from Nuclear Waste," PATENTS-US-A7217916, (1988).

표 1. 특수 핵분열성 물질의 임계량.

Isotopes	Enrichment(%)	Threshold Amount(Kg)
Pu-239	> 95%	8
U-235	>90 95%	25
U-233	-	8

표 2. Pu 또는 U 금속구성요소 완성을 위한 추정 전용시간.

최초의 물질 형태	전용 시간
Pu, 고농축 U, U-233	7 10 일
PuO, PuN, Pu화합물 HEU, U-233 산화물 및 순화합물 혼합산화물 또는 Pu 및 U(U-233+U-235>20%)를 함유하는 그 밖의 미조사 순화합물, scrap과 그 밖의 각종	1 3 주
조사후핵연료 중의 Pu, HEU 또는 U-233	1 2 개월
U-235 및 U-233에서 20% 미만 함유된 U, Th	1 수 년

표 3. 핵물질의 유의량.

적용 구분	핵물질	유의량	비 고
직접이용 가능한 핵물질	Pu (Pu-238<80%)	8Kg	원소 전체
	U-233	8Kg	동위체 전체
	U(U-235>20%)	25Kg	함유되는 U-235
간접이용 가능한 핵물질	NU, DU (U-235<20%)	75Kg	함유되는 U-235
	Th	20t	원소 전체

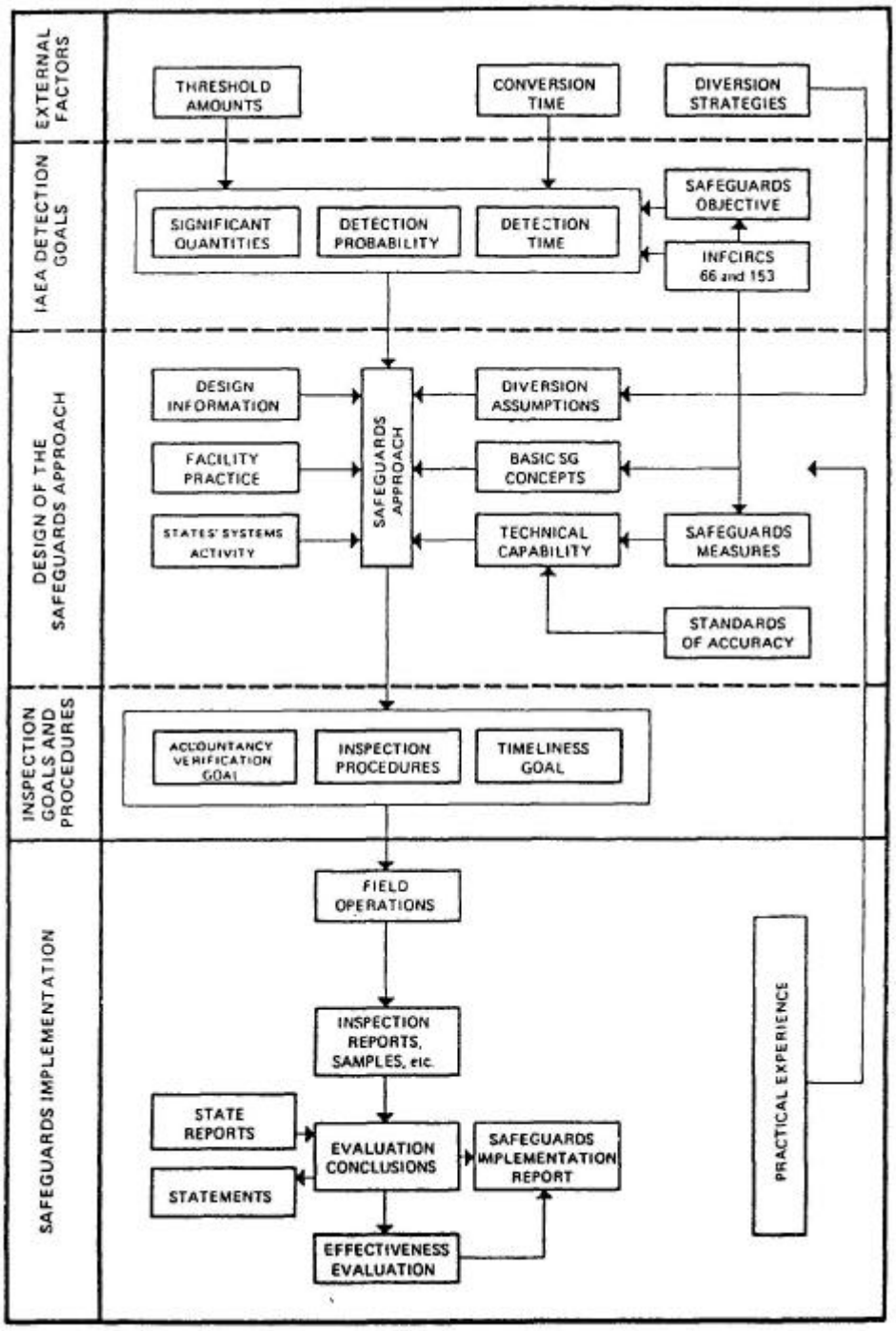

그림1. 핵물질 안전조치 접근방안의 설계절차.

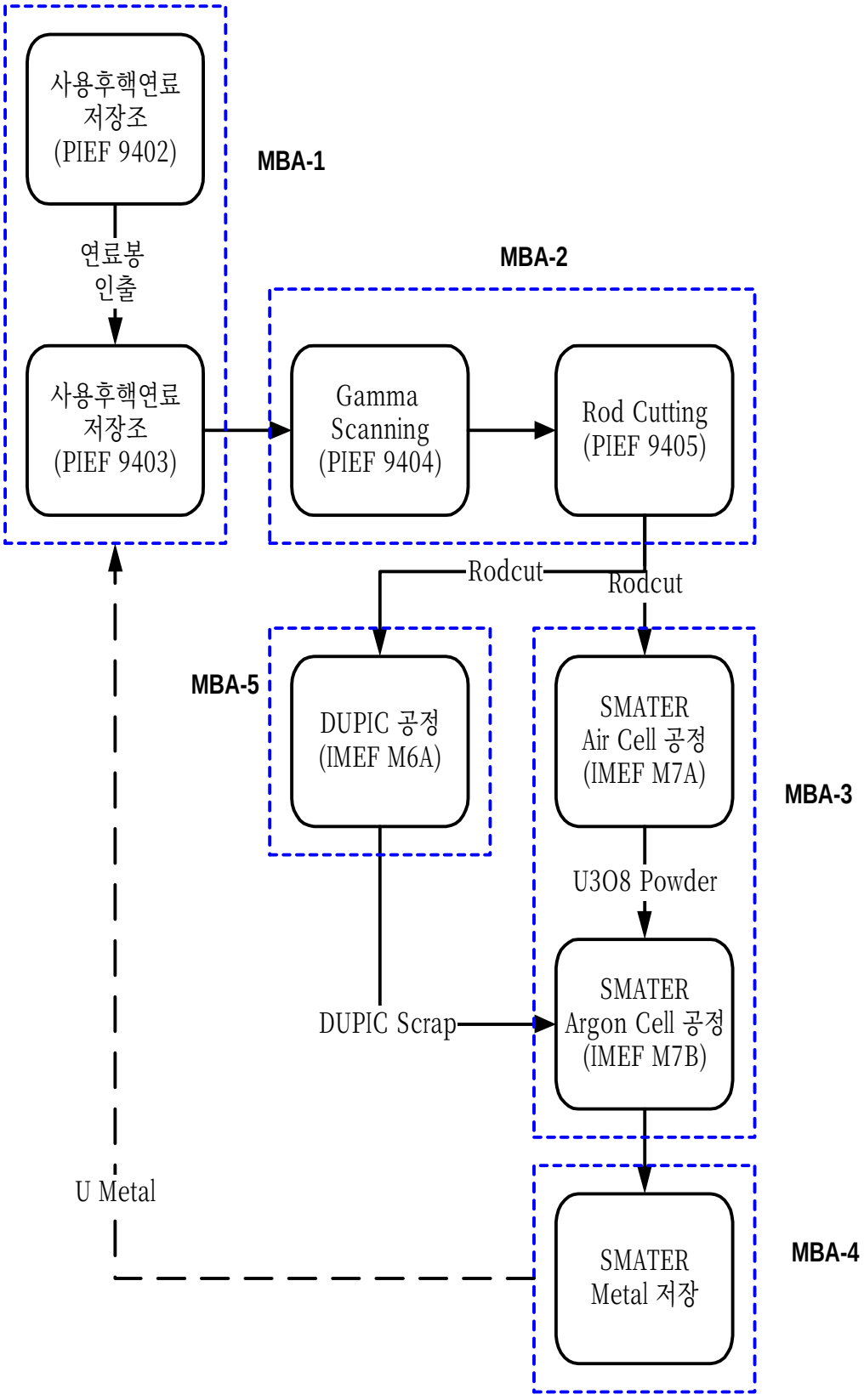

그림2. 차세대 관리공정의 기본 MBA 설정.

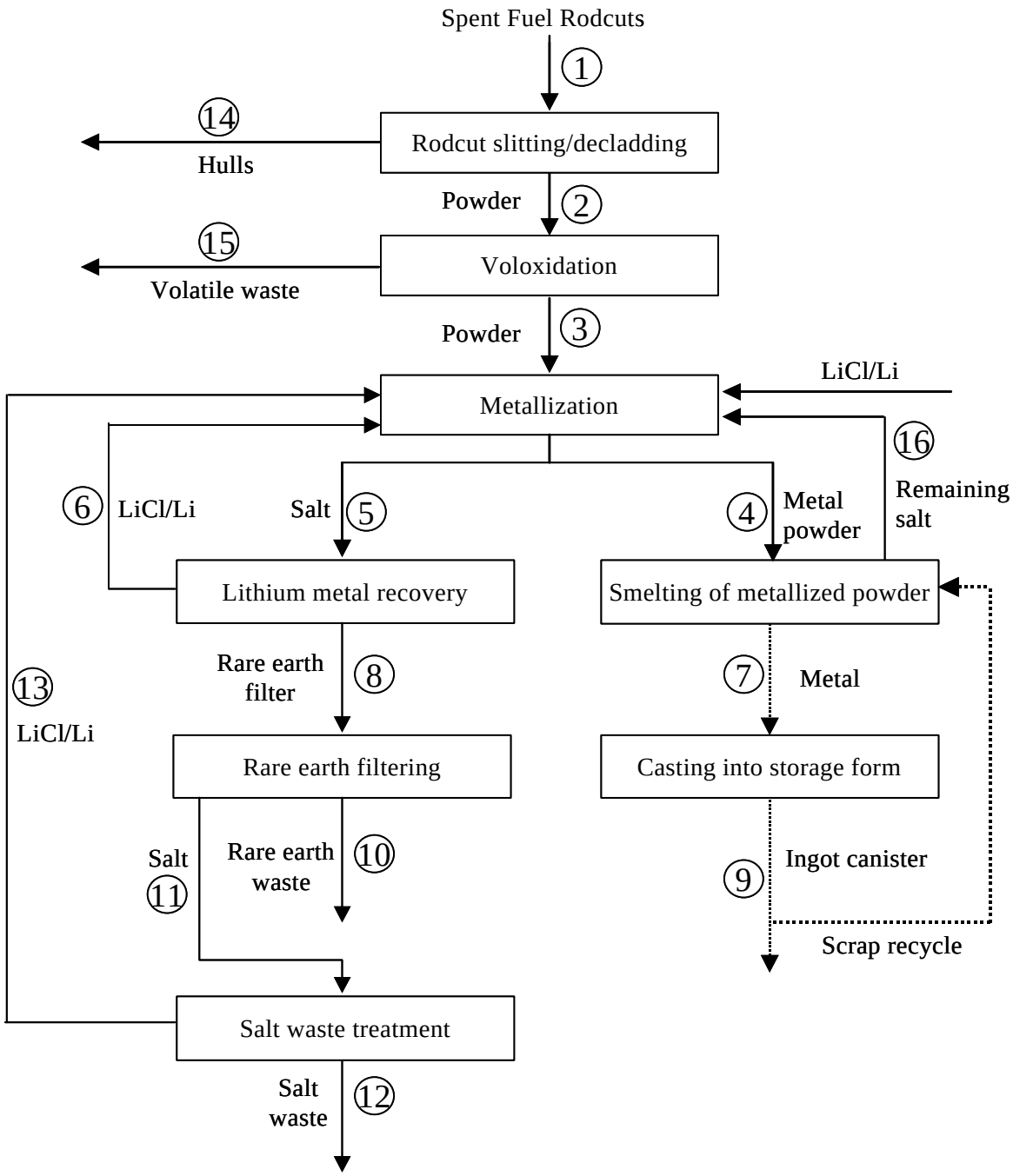

그림3. 차세대 관리공정의 물질흐름.

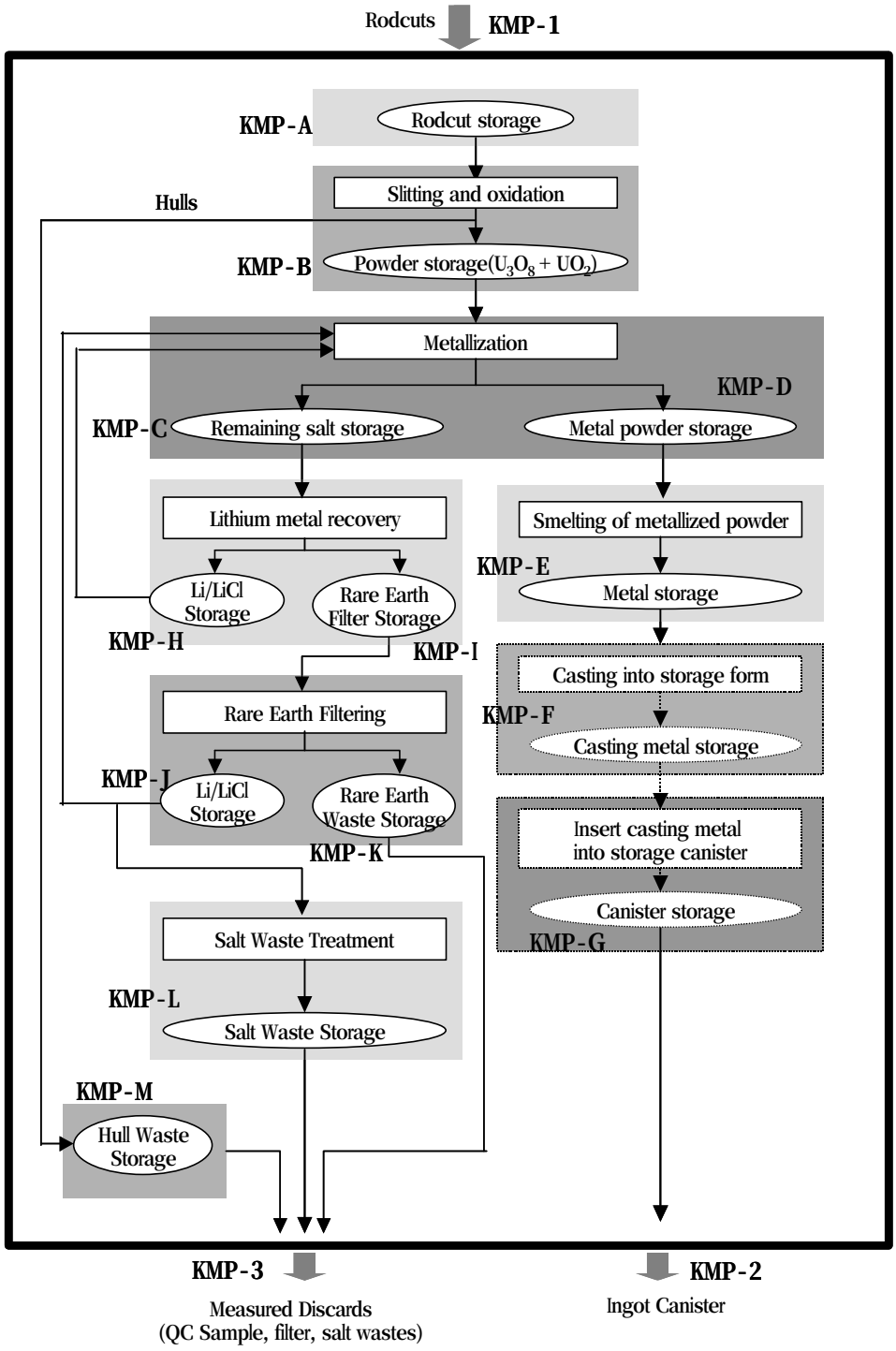

그림4. 차세대 관리공정의 기본 KMP 설정.