

규제해제 대상 방사성 금속 폐기물 최종잔류방사능 측정법

서범경, 지영용, 홍상범, 이근우, 문제권
한국원자력연구원

2013년 11월 18일 접수 / 2013년 12월 2일 1차 수정 / 2013년 12월 4일 채택

세계적으로 원전의 가동 년수 증가로 인하여 증기발생기와 같은 중요 설비의 교체가 지속적으로 이루어지고 있으며, 해체 시에는 대량의 방사성 금속 폐기물이 일시에 발생한다. 이러한 방사성 폐기물을 규제해제 후에 재활용하기 위해서는 정확한 잔류방사능을 측정하여야 한다. 그러나, 원자력시설에서 발생하는 금속 폐기물은 형상이 복잡하고, 재질별 특성이 다양하기 때문에 잔류방사능을 정확히 측정하기가 어렵다. 본 연구에서는 방사성 금속 폐기물의 정확한 잔류방사능을 측정하기 위한 절차를 수립하였고, 오염 대상 선원항 평가, 시료 대표성 확보 방안, 대면적 오염도 측정 장치 제작 및 밀도에 의한 자체흡수 보정인자 등을 평가하였다. 특히, 복잡한 구조의 금속 폐기물에 대하여 시료의 대표성을 확보하기 위하여 용융시킨 후 단순한 형태의 시료를 제조하였으며, 금속의 밀도 차이에 따른 보정인자를 결정하여 방사능 측정 결과의 신뢰성을 향상시켰다.

중심어 : 자체처분, 규제해제, 금속 폐기물, 잔류방사능, 대표시료, 밀도보정

1. 서론

원자력 발전소의 사용 년수 증가로 인하여 개선·보수 및 해체 대상 시설이 지속적으로 증가할 예정이며, 다양한 형태의 방사성 폐기물이 대량으로 발생될 수 있다. 이러한 방사성 폐기물은 제염 등의 처리 과정을 거친 후에 방사선학적 위해도가 기준치 미만인 것으로 판명되면 재활용하거나 일반폐기물로 자체처분 가능하다. 특히, 원자력시설의 해체 시에 발생하는 방사성 폐기물은 대부분이 금속류이나, 현재 국내에서는 방사선학적 안전성을 완전히 확보한 경우를 제외하고는 국민 수용성 등을 고려하여 자체처분 대상에서 제외하고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 금속 폐기물을 재활용하지 않고 직접 처분할 경우에는 환경적인 영향은 10배 이상 크며, 비용 또한 50% 이상 증가하는 것으로 알려져 있다[1].

원전에서 발생하는 증기발생기와 같은 대형 금속폐기물의 경우는 구조가 복잡하고 오염 선원항이 다양하다. 이러한 방사성 폐기물을 자체처분하기 위해서는 잔류방사능 측정 결과의 신뢰도를 확보해야 한다. 방사성 금속 폐기물의 잔류방사능을 측정하기 위한 다양한 기술들이 존재하며, 대형 폐기물의 경우는 형상이 복잡하기 때문에 발생 시점에서 그 형태 및 측정 목적에 맞는 적합한 검출기가 선정되어야 한다. 현재까지 이러한 복잡한 형상을 가지는 대상물의 잔류방사능을 측정하기 위한 다양한 방법들이 적용되고 있으며[2,3], 시료의 형상을 단순화하여 측정 결과의 신뢰도를 높이기 위한 방법들 또한 다양

하게 적용되고 있다[4-6].

또한, 발생한 폐기물에 대하여 대표 시료를 확보하기 위한 시료의 균질성 및 평균화의 적용방안에 대한 평균화가 허용되는 최대 질량 또는 면적을 결정해야한다[7]. 이러한 수치는 물질에 따라 달라지며 해당 물질에 적합한 평균화 절차를 수립해야 한다. 따라서 시료의 채취 및 분석 시에 평균화가 허용되는 폐기물의 최대 질량 또는 면적을 감소시킴으로써 이러한 문제를 최소화할 수 있다[8]. 특히, 금속 시료의 경우는 밀도가 크기 때문에 감마선에 의한 자체흡수를 고려한 밀도 보정이 이루어져야 한다.

이러한 방사능 측정 결과를 바탕으로 자체처분 시에 요구되는 방사선학적 안전성을 평가해야 한다. ICRP (International Commission on Radiological Protection)에서는 고체 방사성 폐기물의 처분에 대한 본격적인 지침을 최초로 발표하였으며[9], IAEA (International Atomic Energy Agency)에서는 원자력시설에서 발생하는 물질의 재활용 및 재사용과 관련된 개인 및 집단선량의 평가 방법론을 포함한 규제해제 등의 개념과 핵종별 면제기준 [10]을 제시하였다. 국내에서도 다양한 폐기물들을 자체 처분하기 위한 연구들이 진행되고 있다[11].

원자력시설에서 발생하는 금속 폐기물의 경우는 그 형상이 복잡하고 다양하기 때문에 기존의 방사성 폐기물 자체처분 절차를 이용해서 처리하기는 어려운 상황이다. 본 연구에서는 복잡한 구조의 금속 폐기물의 잔류방사능 측정 시에 요구되는 대표시료 채취 방법과 방사능 측정 시의 측정 신뢰도 확보 방안에 대한 절차를 수립하였다. 또한, 이러한 수립 절차에 따른 방사성 오염 선원항 평가, 밀도가 큰 금속 시료에 요구되는 보정인자 등을 포함한

교신저자 : 서범경, bumja@kaeri.re.kr
대전 유성구 대덕대로 989번길 111

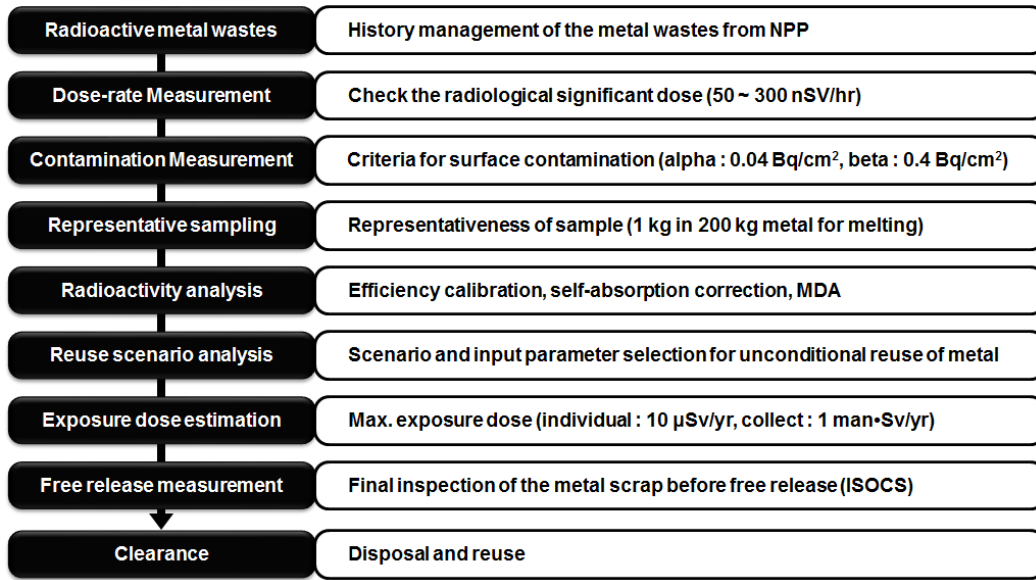


Fig. 1. Radiological safety analysis procedure for reuse of radioactive metal wastes.

Table 1. Neutron Activation Reaction of Main Contamination Nuclides Generated from Pressurized Water Reactor.

Nuclide	Main activation reaction	Half life	Remaining ratio after 5 years
⁵¹ Cr	⁵⁰ Cr(n, γ) ⁵¹ Cr	27.7 d	1.47 × 10 ⁻²⁰
⁵⁴ Mn	⁵⁴ Fe(n, p) ⁵⁴ Mn	312.3 d	0.017
⁵⁸ Co	⁵⁸ Ni(n, p) ⁵⁸ Co	70.82 d	1.75 × 10 ⁻⁸
⁵⁹ Fe	⁵⁸ Fe(n, γ) ⁵⁹ Fe	44.5 d	4.51 × 10 ⁻¹³
⁶⁰ Co	⁶⁰ Ni(n, p) ⁶⁰ Co	5.27 y	0.52

최종잔류방사능 측정법을 확립하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 방사선/능 측정 절차 및 선원항 평가

금속류 방사성 폐기물을 안전하게 관리 및 처리하기 위한 자체처분 안전성 평가 방법론을 Fig. 1과 같이 확립하였다. 먼저, 금속 폐기물이 발생한 시점에서 직접 판단 기준은 아니지만 핵종분석 결과의 신뢰도를 간접적으로 입증하기 위한 유용한 참조값으로서 전체 발생 폐기물에 대한 표면선량율을 측정한다. 자체처분이 가능한 폐기물의 표면 방사선량률은 자연방사선준위의 범위이므로, 측정된 표면방사선량률이 자연방사선준위를 초과하는 폐기물에 대해서는 일단 국부적으로 핵종이 편중되어 존재할 가능성을 재확인해야 한다.

방사성 폐기물을 규제해제 후에 재활용하기 위해서는 오염 핵종에 대한 정확한 사전 정보가 필요하다. 이들 오염된 핵종의 선원항을 평가하여 최종 재활용 시의 정확한 핵종별 규제해제 농도를 도출할 수 있다. 금속 폐기물은 그 시설의 사용처에 따라 다양한 방사성 핵종들이 포함되어 있다. 그러나 대부분의 핵종들은 반감기가 짧아 검출이 거의 불가능하거나 자체처분에 따른 방사선 위험도가 매우 낮기 때문에 폐기물에 포함되어 있을 것으로 추정되

는 모든 방사성 핵종들을 측정하는 것은 바람직하지 않으며, 방사선 안전측면에서 필요한 방사성 핵종을 선정하는 것이 중요하다. 원전에서 발생한 금속 폐기물의 경우는 원자로 내부 부식 생성물의 방사화에 의한 핵종이 주된 오염원이다. 특히, 가압경수로형 원자로의 경우에는 원자로 및 냉각계의 주 재질인 Fe, Cr, Ni 합금과 기타 구동부 및 베어링의 재료인 Co 합금의 부식 생성물로서 Table 1과 같은 중성자 핵반응에 의하여 주로 생성된다. 이들 부식 생성물의 기간 경과에 따른 방사능 변화율을 측정하였으며, 이를 통하여 실제 자체처분 안전성 평가 시의 대상 핵종을 선정하였다.

2.2. 방사선/능 측정 및 보정인자 결정

표면오염의 경우는 측정 대상 표면을 검출기를 이용하여 직접 측정하는 방법과 문지름법을 이용하여 대상 표면의 시료를 채취하여 검출기로 오염도를 측정하는 간접법이 있다. 이러한 방법을 이용하여 알파선과 베타선의 표면오염도를 사전에 측정하고 국부 오염 지역 유무의 판단 근거로 사용한다. 특히, 국내 법령에서는 방사선관리구역에서 반출되는 모든 물품에 대하여 반출기준의 만족을 요건화하고 있어, 폐기물의 자체처분을 위해서는 반출기준(알파선을 방출하는 방사성 물질에 대해서는 0.04 Bq cm⁻² 이하, 알파선을 방출하지 않는 방사성 물질에 대해서는 0.4 Bq cm⁻² 이하)을 만족해야 한다.

표면선량과 오염도 측정을 한 후에는 최종 잔류방사능을 평가하기 위하여 대표시료를 채취하여 핵종별 방사능 분석을 수행한다. 측정 대상의 방사능 농도는 측정결과의 정확성뿐만 아니라 그 물체로부터 시료를 채취하는 방법에도 크게 의존한다. 대표시료는 모집단 폐기물 약 200 kg 마다 또는 매 1 m² 면적당 오염을 대표할 수 있는 약 1 kg의 대표시료를 채취한다(7).

체적 시료의 경우에 방출되는 감마선의 일부는 시료의 두께로 인하여 시료 자체에서 흡수되며, 이러한 자체흡수는 시료의 두께가 두꺼울수록, 시료의 선감쇠계수가 클수록 잘 일어난다. 체적선원으로 구한 피크 효율은 체적선원 자신의 자기흡수 효과가 포함되어 있으므로 시료의 재질이나 밀도 또는 에너지가 다른 경우에 자기흡수의 정도가 달라져 오차가 생긴다. 자체흡수는 측정용기와 검출기의 기하학적인 구조를 정확히 알고, 시료가 동일한 재질로 균일하게 채워져 있는 경우에는 계산에 의해 자기흡수를 구할 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 측정 용기인 원통형과 마리넬리 형에 대하여 MCNP 코드를 이용하여 선원의 밀도에 따른 자체흡수 보정인자를 결정하였다.

최종잔류방사능 측정이 완료된 방사성 금속 폐기물에 대하여 일반 폐기물로 전환되어 재활용될 수 있는 다양한 시나리오에 대하여 국내여건을 고려하여 피폭선량을 평가하였다. 특히, 방사성 금속 폐기물은 일반적인 금속 폐기물의 재활용 처리 단계와 동일하게 해체 및 세절한 후에 재활용을 위해서 제철 공장으로 이송되어 용융된다. 이후 다양한 제품으로 재활용되어 유통되며, 이러한 전체 과정을 대상으로 예상 피폭선량을 도출하기 위한 시나리오를 적용하여 평가하여야 한다. 금속 폐기물의 자체처분을 위해 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 이용하여 피폭선량을 평가하며, 개인에 대한 연간 피폭선량이 10 μSv yr⁻¹ 미만이거나 집단에 대한 연간 피폭선량이 1 man-Sv yr⁻¹ 미만이라는 것을 입증해야 한다.

자체처분이 결정된 폐기물에 대하여 일반 폐기물로 반출하기 전에 최종 오염 여부를 검증할 수 있는 대용량 측정 시스템이 주로 이용되고 있으며, 현장에서 직접 방사능을 측정할 수 있는 휴대용 Ge 검출 시스템인 ISOCs (In-situ Object Counting System), 대용량 감마선 측정 시스템 등과 같은 장비들이 많이 사용되고 있다(3,12,13). 이들 시스템을 이용하여 최종 반출하기 전에 폐기물 중에 남아있을 수 있는 오염의 가능성을 마지막으로 확인할 수 있다.

또한, 방사성 폐기물을 자체처분하기 위해서는 감마선 뿐만 아니라 알파선 또는 베타선 방출핵종에 대한 방사능도 분석해야한다. 감마선을 방출하는 핵종의 농도는 HPGe 검출기와 같은 감마핵종 분석기를 이용하여 비교적 쉽게 측정할 수 있다. 그러나, 알파 및 베타방출 핵종의 경우 화학적인 추출 및 정제과정을 통해 핵종을 선택적으로 분리한 후에 측정해야하며, 이러한 방법은 그 과정에 매우 복잡하고, 상당한 비용과 시간이 필요하다. 그래서 많은 국가에서는 척도인자(scaling factor)를 개발하여 폐기물에 적용하기 위한 노력을 하고 있다(14,15). 이

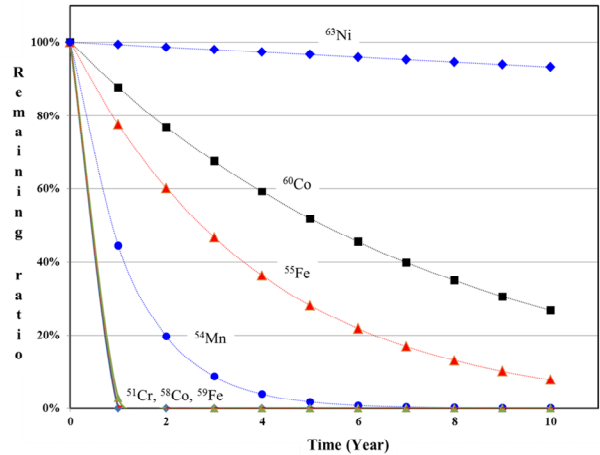


Fig. 2. The fraction of radioactivity still remaining in the radioactive metal with time variation.

러한 척도인자는 원자로형 및 폐기물 발생원별로 차이가 나며 각 시설의 특성을 반영하여 도출하고, 주기적으로 검증을 해야 한다.

3. 결과 및 논의

방사성 폐기물을 재활용하기 위해서는 오염 핵종에 대한 정확한 사전 정보가 필요하며, 이들 발생된 폐기물의 선원항을 평가하여 최종 재활용 시의 정확한 핵종별 규제 해제 농도를 도출할 수 있다. 원자력시설에서 발생한 금속 폐기물의 경우는 즉시 처리하지 않고, 일정기간 방사능 감쇄를 거친 후에 처리를 하게 된다. 이러한 시간 경과에 따른 선원항별 방사능 잔존비를 평가한 결과는 Fig. 2와 같다. 위의 대상 핵종 중에서 대표적인 감마핵종의 경우, 5년간의 감쇄기간을 거칠 경우에는 ⁵⁴Mn와 ⁶⁰Co을 제외한 핵종들은 모두 무시할 수 있는 수준으로 붕괴되어 피폭평가 시에 제외하여도 무방하다. 그러나 처리의 시급성 등으로 인하여 감쇄시간이 충분하지 않을 경우에는 시간 경과에 따른 잔존비를 평가하여 대상 핵종을 선정하여야 한다.

방사성 표면오염도 측정 시의 작업자의 피폭 가능성을 줄이고, 작업의 시간을 단축하기 위하여 대면적의 오염도를 자동으로 측정할 수 있는 측정 장치를 개발하였다. 대면적 오염도 자동 측정장치는 Fig. 3과 같으며, 측정하고자 하는 대상 표면의 오염도를 일정한 속도를 스캔한 후에 그 측정 결과를 위치 정보와 결합하여 오염도 준위를 시각화할 수 있도록 제작하였다. 대면적 오염도 측정의 적용성을 시험하기 위하여 알파선과 베타선 선원을 이용하여 측정하였다. 알파선과 베타선의 오염도는 각각 전체 이동경로에 따른 계수값으로 표시하며 이를 다시 2차원으로 mapping하여 전체 면적에 대하여 오염 준위를 나타낼 수 있도록 하였다. 측정 결과 알파선과 베타선에 대하여 국소오염 지점을 정확히 측정할 수 있다는 것을 확인하였다.

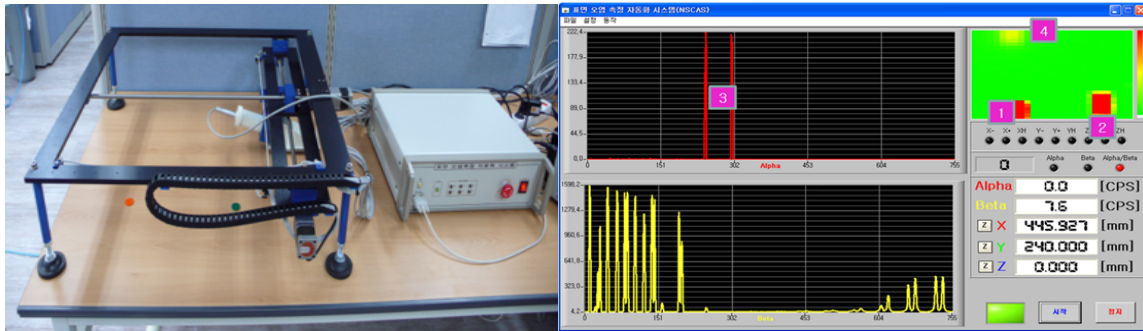


Fig. 3. Automatic monitoring system for large surface area contamination measurement.



Fig. 4. Representative sample of the radioactive metal waste using melting method.

실제 잔류방사능을 정확하게 측정하기 위해서는 대표 시료를 채취하여 방사능 분석을 수행한다. 본 연구에서는 금속 폐기물의 대상별로 시료채취 방안을 수립하였다. 우선 가장 일반적인 형태로서 넓은 판형과 같은 단순한 구조의 표면 오염인 경우는 scabbling 방법을 이용하여 표면의 오염 시료만을 채취한다. 시료 채취는 1 m² 면적당 폐기물 표면오염을 대표할 수 있는 약 1 kg의 대표시료 채취하며, 표면적이 1 m² 미만인 경우는 몇 개의 시료를 합쳐서 1 m² 당 1 kg의 시료를 채취한다.

또한, 기하학적인 구조가 복잡한 볼트, 너트, 모터 등과 같은 금속 폐기물의 경우는 대표 시료 채취가 기존의 방법을 이용해서는 불가능하다. 이러한 경우 적용할 수 있는 방법이 금속을 용융하여 시료의 균질성을 확보한 후에 대표 시료를 채취하여 방사능을 측정한다. 이러한 금속 용융을 이용할 경우에는 잔류방사능 분포의 균질화를 통하여 시료 대표성을 확보할 수 있으며, 용융 후 채취한 시료의 경우에는 Fig. 4와 같이 단순한 기하학적 조건으로 인하여 효율 교정이 용이하여 정확한 방사능 평가가 가능하다. 그러나 금속 폐기물을 용융하여 대표 시료를 채취할 경우에는 용융에 의하여 표면 오염이 체적 오염으로 전이하는 효과를 고려해야 한다.

금속성 시료의 방사능을 분석할 경우, 가장 오차가 큰 요인으로서 표준선원(밀도=1)과 측정용 시료(밀도 약 8)의 밀도 차이에 따른 자체흡수 효과이다. 이러한 밀도 차이에 따른 효율을 계산하고 원래의 표준선원의 밀도와 비교한 결과는 원통형 측정용기와 450 ml 및 1000 ml 마리넬리 측정용기에 대하여 Fig. 5-7에 각각 나타내었다.

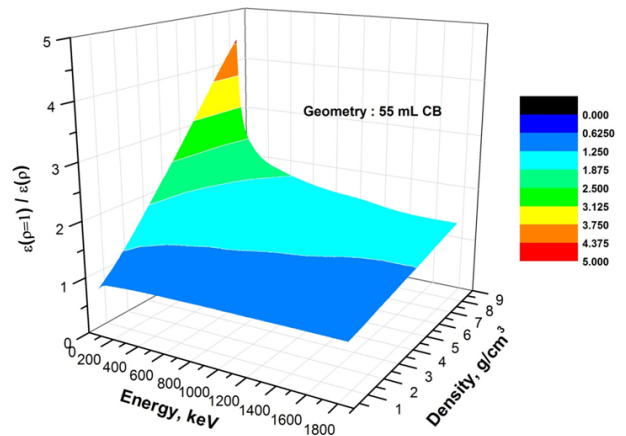


Fig. 5. Self-absorption coefficient for the 55 mL cylindrical beaker with gamma-ray energy and metal density variation.

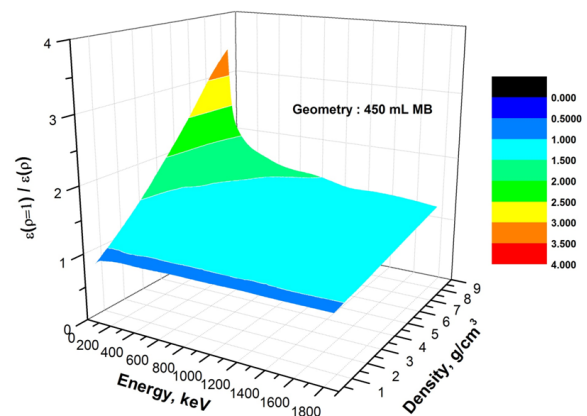


Fig. 6. Self-absorption coefficient for the 450 mL Marinelli beaker with gamma-ray energy and metal density variation.

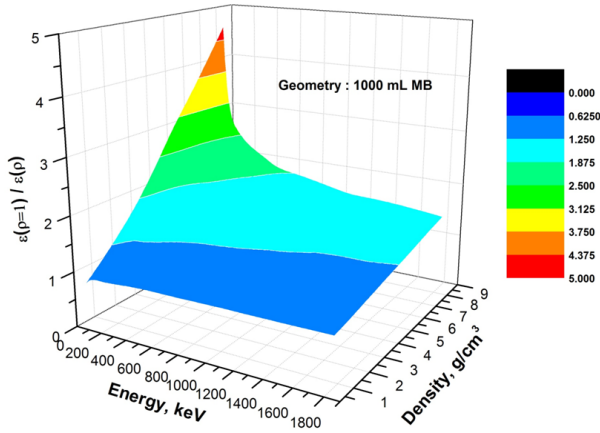


Fig. 7. Self-absorption coefficient for the 1,000 mL Marinelli beaker with gamma-ray energy and metal density variation.

Fig. 5-7에서 보는 바와 같이, 밀도가 높고, 에너지 낮은 영역에서는 원래의 효율과 4배 이상의 차이를 보였으며, 이는 실제 측정 시에는 심각한 오류를 야기할 수 있다.

4. 결론

원전의 설비 교체 및 해체 시에는 대량의 방사성 폐기물이 발생된다. 특히, 방사성 금속 폐기물의 경우는 규제해제 후에 생활 소비재로 직접 재활용될 가능성이 크기 때문에 정확한 방사선학적 위해도 평가가 요구된다. 본 연구에서는 방사성 금속 폐기물의 자체처분 시에 가장 중요한 최종잔류방사능 측정 및 평가 방안을 수립하였다. 먼저, 발생하는 폐기물의 오염 선원항을 선정하였고, 시간 경과에 따른 방사능을 계산하여 방사선학적 위해도에 영향을 미칠 수 있는 평가 대상 핵종을 결정하였다. 또한, 최종잔류방사능 측정 결과의 신뢰도에 가장 영향을 미칠 수 있는 시료 대표성을 확보하기 위하여 대상 시료들을 표면오염과 체적오염으로 구분하여 대표시료 채취 방법을 수립하였다. 특히, 시료 대표성 확보가 어려운 복잡한 형상의 금속류의 경우는 용융한 후에 주괴 형태로 만들어 측정함으로써 시료의 균질성을 확보할 수 있었다.

이러한 측정 절차를 바탕으로 최종잔류방사능/능 측정 시에 요구되는 대면적 표면오염도 측정장치를 개발하였으며, 금속 시료의 방사능 측정 시에 가장 큰 요차요인이 될 수 있는 밀도 차이에 따른 효율 보정인자를 결정하였다. 이를 통하여 현재까지 자체처분이 어려운 복잡한 구조의 방사성 금속 폐기물의 정확한 잔류방사능 측정 및 안전성 향상을 통한 신뢰도를 확보하여 재활용성을 증대시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

1. OECD/NEA, Nuclear decommissioning: Recycling

and reuse of scrap metals. Paris France, 1996.

2. 김계홍, 박찬희, 정종현, 이근우, 서범경. 배관 내부 방사능 오염도 측정용 ZnS(Ag)/BC-408 phoswich 검출기 개발. 방사선방어학회지. 2006;31(3): 123-128.

3. Meyer KE. Rapid/low-cost radiological characterization of residual uranium and technetium in contaminated scrap metal piles. 2004 WM'04 Conference, February 29 - March 4. Tucson USA.

4. Lorenzen J, Lindberg M. Decontamination-melting of uranium-contaminated metal. 2000 WM'00 Conference, February 27 - March 2, Tucson USA.

5. Hwang DS. Melting decontamination of the dismantled metal waste from the uranium conversion plant. 2009 ISRS, November 4 - 6, Daejeon Korea.

6. Anmdersson L. Recycling of contaminated metals for free release. 1999 WM'99 Conference, February 28 - March 4, Tucson USA.

7. 김완태. 방사선/폐기물 분야 규제지침(안) 개발. KINS/RR-733. 2009.

8. Hong DS, Ji YY, Kang IS, Kim TK, Ryu WS. Cost-benefit analysis for the regulatory clearance of soil and concrete waste at KAERI. 2010 WM2010 Conference, March 7 - 11, Phoenix USA.

9. ICRP. Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste. ICRP Publication 46. 1985.

10. IAEA. Application of the concepts of exclusion, exemption and clearance. Safety Standards Series No. RS-G-1.7, Vienna, 2004.

11. 홍상범, 이봉재, 정운수. 연구로 1, 2호기 해체 철재 폐기물의 규제해제농도기준(안) 도출을 위한 연구. 방사성폐기물학회지. 2004;2(1):61-67.

12. VF. FRM-02 series free release monitor, data sheet VF B-06-B0002a. <http://www.vf.eu/data/files/b-06-b0002a-130527-frm-02-series-28-en.pdf>.

13. Yamanaka T, Yamaguchi N, Ishikura T, Oguri D. The technical development on residual radioactivity measurement during decommissioning. 2003 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE11), April 20-23, Tokyo Japan.

14. 황기하, 이상철, 강상희, 이근재, 정찬우, 안상면, 김태욱, 김경덕, 허영희, 송명재. 국내 원전 대상의 척도인자를 활용한 핵종재고량 규명 방법의 개발. 방사성폐기물학회지. 2004;2(1):77-85.

15. IAEA. Determination and use of scaling factors for waste characterization in nuclear power plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.18. Vienna, 2009.

Measurement Method of Final Residual Radioactivity of Radioactive Metallic Waste for Clearance

Bumkyoung Seo, Youngyong Ji, Sangbum Hong, Keunwoo Lee, and Jeikwon Moon
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - It has been continuously generated the requirement for the replacement of the main components such as a steam generator due to the deterioration of the nuclear power plant all around the world. Also, a large amount of radioactive metal was generated during the decommissioning in a short period. It is required to make an accurate measurement of the residual radioactivity for recycling the metal waste for releasing from regulatory control. In planning the measurement procedures, the influence of geometry, self-absorption, density and other relevant factors on the representativeness of the measurements should be considered for the decommissioning metal waste. In this study, the method for measurement procedures, the source term evaluation, the ways to secure representative samples, the measurement device for wide area and the self-absorption correction factors for different density were evaluated. The metal samples for measurement were prepared for securing the simple geometry and representative by melting process. The developed correction method for measuring the radioactivity a variety density of metal waste could improve the reliability of the evaluation results for clearance.

Keywords : Free release, Clearance, Metal waste, Residual radioactivity, Representative sample, Density correction