

중성자를 효율적으로 차폐하기 위해 (2)

— 차폐재의 조합과 최적차폐 —

植木 雄太郎

Kontanro Ueki

운수성 선박기술연구소 원자력기술부

앞 호에서는 중성자를 효율있게 차폐하기 위해서는 우선 차폐성능이 좋은 재료를 선택하는 것이 중요하다는 점을 논하였다. 또한 몇가지 차폐재에 대한 실험에 의해 구해진 중성자의 차폐성능에 관해서도 소개하였다. 이번 호에서는 다음 단계로서 중성자 차폐를 필요로 할 경우에 사용 가능한 공간이나 중량에 엄격한 제한이 있기는 하지만, 주위에 구조물(건물일 경우에는 콘크리트 벽, 배일 때는 강판제의 화벽 등)이 있을 경우에는, 이것을 잘 이용한 보다 좋은 최적 차폐를 구축할 수 있는 가능성에 대해 기술한다. 최적 차폐의 구축은 방사선 안전성의 향상과 차폐시설의 건조비 저감이라는 명제의 양자를 만족시키는 것이므로 주목할만한 연구분야라 하겠다.

1. 머리말

앞 호(「차폐성능이 좋은 재료 선택」)에서는 차폐재를 단독으로 사용한 경우의 중성자 차폐성능에 관해 소개하였다. 확실히 그러한

차폐재를 사용하면 각각의 차폐성능이 얻어지게 된다. 그러나 실제 차폐를 필요로 하는 시설 내지 기기를 생각해볼 때 중성자 차폐재가 단독으로 사용될 수 있는 환경에 있는 일은 오히려 드물며, 일반적으로는 구조재와 함께 사용하는 경우가 많다. 이를테면 건물내의 경우 주위는 두꺼운 콘크리트 벽으로 덮혀 있어, 그 속에 설치되어 있는 기기는 스테인레스스틸이나 강판으로 되어 있다. 배는 전체가 두꺼운 강판제이며, 사용제연료 수송용기(캐스크)에는 두께 30cm 정도의 강판이 사용되고 있다.

단독으로는 사용이 어려운 중성자 차폐재료도 많다. 이를테면 폴리에틸렌은 비교적 싼 가격이어서 2MeV 정도의 중성자에 대해서는 가장 차폐성능이 좋은 재료이기는 하지만, 연화 온도가 수십도이며 내열성이나 내화성이 약하기 때문에 원자력시설 등에는 직접적인 단독 사용에는 제한이 있다. 또한 기계적 강도도 약하다.

그러므로 이번 호에서는 구조로서 사용되고 있는 스테인레스스틸이나 강판을 적극적

으로 활용하여 그것과 중성자 차폐재와의 조합을 연구함으로써 중성자 차폐재를 단독으로 사용하는 경우보다 분명히 차폐효과가 높아지는 (이 효과를 Enhancement Effect라 칭한다.)¹⁾ 점과, 또한 이 고양 효과를 응용하는 것에 의해 스테인레스스틸과 폴리에틸렌, 스테인레스스틸과 사문암(蛇紋岩) 콘크리트와의 차폐체계에 있어 최적 차폐배열을 구축 할 수 있다는 점에¹⁾ 대해 소개한다. 스테인레스스틸을 보통의 탄소강으로 하여도 같은 효과를 거둘 수 있지만,²⁾ 이것은 강을 조성하는 철의 비탄성산란에 의해 중성자의 에너지가 크게 감소하는 과정을 이용하는 것이다. 2MeV 정도의 중성자에 대한 비탄성 산란 단면적은 철, 니켈, 크롬 등의 중중핵(中重核)에는 크고, 산소, 탄소, 질소 등의 경핵에는 적으며, 수소에는 제로이다.

2. 배열효과

앞 호 Fig. 1에 나타난 타입2 실험체계에 있어 스테인레스스틸 + 폴리에틸렌 평판 체계를 사용하여 스테인레스스틸을 그림과 같이 ²⁵²Cf중성자 선원측에 두는 경우 및 폴리에틸렌을 선원측에 설정하여 스테인레스스틸을 검출기측에 두는 경우의 실험을 하였다. 타입2의 실험목적은 스테인레스스틸을 구성하는 철, 니켈, 크롬 등의 중중핵이 가진 비탄성 산란 단면적에 의해 ²⁵²Cf에서 발생하는 고속 중성자가 1회의 산란에 의해 크게 에너지를 잃은 다음 중속 중성자가 되고, 이것이 폴리에틸렌을 구성하는 수소에 의해 재빨리 열 중성자가 된다고 하는 중성자 차폐에 대한 스테인레스스틸의 고양효과를 실증하기 위함이다. 따라서 스테인레스스틸을 선원측에 설정하는 것이 검출기측에 두는 경우보다 체계를 투과하는 중성자의 선량당량을의 저감을 기대할 수 있다. 그리고 스테인레스스틸의 후

방(검출기측)에 둔 폴리에틸렌의 차폐성능(이를테면 1/10 가층 : 중성자 등의 선량당량을 1/10로 감쇠시키는데 필요한 차폐재의 두께)은 이 고양 효과에 의해 폴리에틸렌을 단독으로 사용하는 경우보다 분명히 향상한다.

Fig. 3은 Fig. 1의 타입2 실험체계의 실험 결과 및 그 몬테카를로해석과의 비교를 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타난 비교에서 알 수 있듯이, 스테인레스스틸을 중성자 선원측에 둔 체계에서는 검출기측에 설정한 체계에 비해 폴리에틸렌의 두께에 대한 중성자 선량당량을 감쇠곡선의 구배가 분명히 크며, 스테인레스스틸을 선원측에 두는 것에 의한 차폐성능의 현저한 향상을 볼 수 있다. 앞에 논한

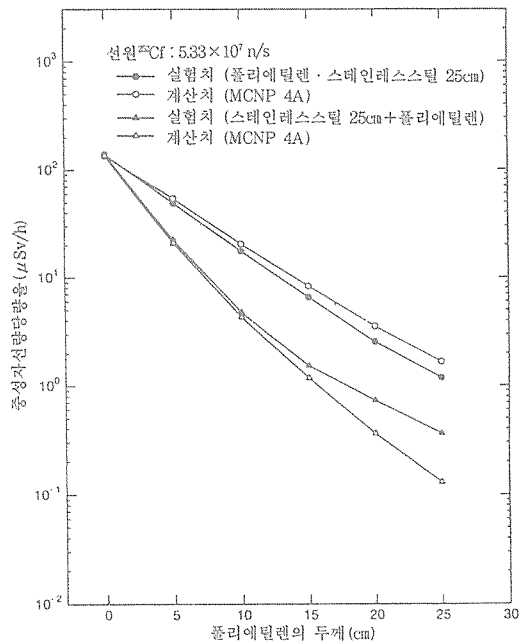


Fig. 3 Fig. 1의 타입2 실험체계에 있어 폴리에틸렌 + 스테인레스스틸과 스테인레스스틸 + 폴리에틸렌의 배열 차이에 의한 중성자 선량당량을 감쇠 프로파일

1/10가층에 대해 고찰하면, 폴리에틸렌을 선원측에 둔 체계(폴리에틸렌+스테인레스스틸)에서는 1/10가층은 12cm이며, 폴리에틸렌 단독사용의 12.5cm와 본질적인 차이는 없으나, 스테인레스스틸+폴리에틸렌 체계에서는 1/10가층은 7cm가 되어, 거의 1/2이다. 이 12cm→7cm가 폴리에틸렌에 대한 스테인레스스틸의 고양효과이며, 본연구에 의해 실험 및 몬테카를로 해석의 양면에서 실증된 것이 된다.

Fig. 3에 있어 스테인레스스틸+폴리에틸렌 체계에서는 폴리에틸렌 평판의 두께가 두껍게 됨에 따라 실험치와 계산치와의 차가 크게 되는 경향이 강하게 되지만, 이것의 주요한 요인은 실험치에서는 실험실의 구조물이나 벽, 마루 등에서 산란성의 기여가 있는 것으로 생각된다. 이러한 실내 산란의 기여를 측정치에서 제하기 위해, Fig. 1의 선원 콜리미터의 45°로 열린 원추부분을 원추형의 폴리에틸렌 블록으로 막은 상태에서 측정하여 공제한 다음 실질의 체계(體系) 투과선 선량당량을 구하고 있다. 그러나 이러한 방법으로는 체계중에서 산란하고, 실험실내에서 산란하여 검출기에 들어가는 산란선의 기여를 통제할 수는 없으며, 결과적으로 측정치에 산란성의 기여가 포함되어 과대평가가 된 것으로 생각되어 진다. 따라서 Fig. 3의 폴리에틸렌의 두꺼운 부분에서는 몬테카를로해석의 계산치 쪽이 실제로 보다 가까운 수치를 나타내고 있는 것으로 추정된다. 또한 폴리에틸렌 두께가 15cm를 초과하면 선량당량이 $1\mu\text{Sv/h}$ 이하가 되어, 본실험에서 사용한 감속형 중성자 서베이미터로서의 측정정도는 그다지 좋지 않다.

3. 최적차폐 배열의 구축

앞 호의 Fig. 1에 나타난 타입3 실험체계에 있어, 스테인레스스틸+폴리에틸렌 평판

및 스테인레스스틸+사문암콘크리트 평판을 샌드위치 체계로 조립시켜 폴리에틸렌 또는 사문암콘크리트의 삽입위치를 바꾸는 것에 의해 체계를 투과하는 중성자+2차 감마선의 선량당량이 최소가 되는 위치를 찾는, 다시 말해 최적차폐 배열을 구축하는 것을 노리는 실험을 행하였다.

본실험은 타입2를 응용하는 것으로, 바꿔 말하면 스테인레스스틸의 고양효과에 의해 최적차폐가 가능하다는 것을 실증하기 위한 실험이다.

Fig. 4 및 Fig. 5에 타입3 실험체계에서 행한 실험치와 몬테카를로해석결과의 비교를 밝힌다. Fig. 4는 스테인레스스틸+폴리에틸렌 체계이며, Fig. 5는 스테인레스스틸+사문암콘크리트 체계이다. 본실험에서 취급한 사문암콘크리트는 앞 호에서 언급한 바와 같이 보통 콘크리트보다도 함유소량이 많기 때문에 그 정도만큼 중성자 차폐성이 좋지만, 1/10가층은 20cm이어서 폴리에틸렌의 12.5cm와 비교하면 상당히 못하다. 이러한 중성자 차폐제일 지라도 스테인레스스틸과의 배합에 의해 최적차폐배열을 찾을 수 있는가의 실험결과가 Fig. 5이다.

Fig. 4 및 Fig. 5에 있어 횡축 t는 차폐재의 삽입위치를 나타낸 것으로, 이를테면 Fig. 4에서 t의 10cm는, 두께 15cm의 폴리에틸렌 평판이 두께 10cm 스테인레스스틸(선원측)과 두께 15cm 스테인레스스틸(검출기측)과의 사이에 샌드위치되어 있는 체계를 뜻하고 있다. 따라서 체계 전체의 두께는 폴리에틸렌 삽입위치와 관계없이 40cm이다. 사문암을 사용한 체계에서도 t의 뜻은 같지만, 사문암의 두께가 20cm이므로 체계 전체의 두께는 45cm이다.

Fig. 4 및 Fig. 5에서 알 수 있듯이, 차폐체의 삽입위치를 후방(검출기 쪽)으로 이동함에 따라 중성자와 2차 감마선을 합제한 전선량당량이 감소하여 t=20cm의 곳에서 최소

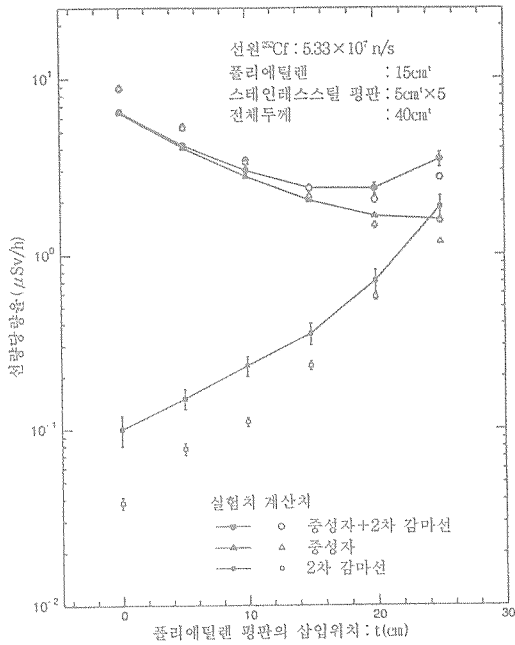


Fig. 4 Fig. 1의 타이프 실험체계에 있어 스테인레스스틸 평판안에 삽입된 폴리에틸렌 평판의 위치 t 를 관수로 한 선량당량을 변화의 실험과 몬테카를로해석과의 비교

가 되며, $t=25\text{cm}$ 즉 두께 25cm의 스테인레스스틸을 모두 선원쪽으로 밀어 그 뒷쪽(검출기쪽)에 각각의 차폐체를 둔 경우 약간 증가하고 있다. 이 결과에서 $t=20\text{cm}$ 의 위치가 전선량당량이 최소가 되는 위치이며, 이 위치에서 최적차폐 배열이 구축된 것이 된다. 또한 Fig. 4 및 Fig. 5 모두의 최대 전선량당량은 $t=0\text{cm}$, 즉 차폐재 전체를 선원측에 설정한 경우이다. 전선량당량을 구축하는 중성자 및 2차 감마선에 대해 관찰하면, 중성자는 t 가 크게 됨에 따라 감소하며, 2차 감마선은 역으로 증가하고 있다. 이것은, t 가 크게 된다는 것은 선원측에 있는 스테인레스스틸의 부피가 두껍게 되기 때문에 그만큼 고양 효과가 크게 되어 중성자 선량당량은 저감

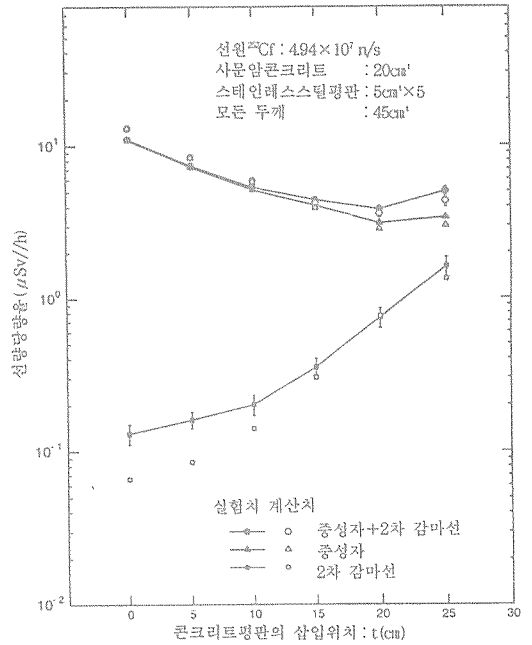


Fig. 5 Fig.1의 타이프 실험체계에 있어 스테인레스스틸 평판 안에 삽입된 사문암콘크리트 평판의 위치 t 를 관수로 한 선량당량을 변화의 실험과 몬테카를로해석과의 비교

되지만, 역으로 검출기 쪽에 둔 스테인레스스틸은 얇게 되므로 차폐체 안의 수소에 의해 흡수된 중성자에 의해 발생하는 2차 감마선(약 2MeV)에 대한 차폐효과가 기대할 수 없게 되므로 어느 체계에 있어서도 2차 감마선 선량당량은 t 가 크게 됨에 따라 급격한 증가를 나타내고 있다.

다음으로 최적 차폐배열의 구축이 어느 정도 선량당량을 저감에 기여하는가를 고찰하기로 한다. 선량당량을 저감의 기준이 되는 전선량당량을 최대치/최소치의 비를 구하면 Fig. 4의 스테인레스스틸+폴리에틸렌 체계에서는 2.8, Fig. 5의 스테인레스스틸+사문암콘크리트 체계에서는 2.9이며, 어느 체계에 있어서도 최적 차폐배열을 구축하는 것에 의해

사용제연료수송용기(HZ-75T형 캐스크)

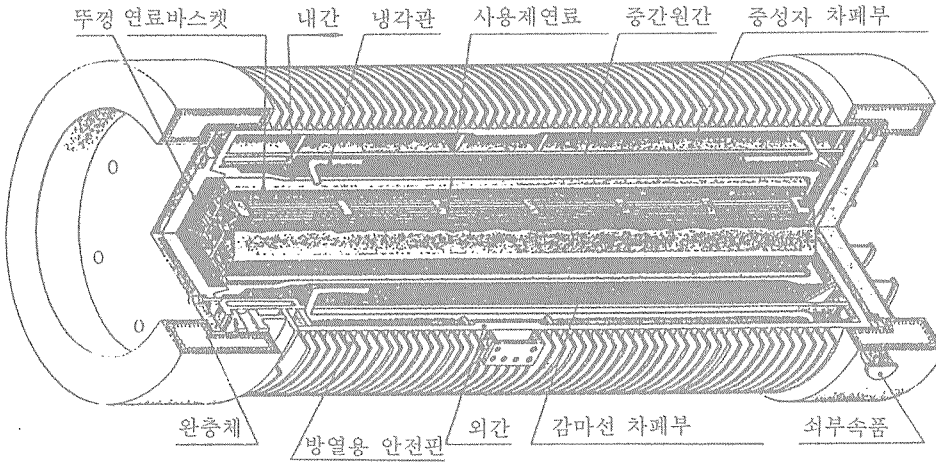


Fig. 6 使用済燃料輸送容器 (캐스크) 의 概念圖

전선량당량을 1/3 정도로 저감할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 전체의 두께는 바꾸지 않고 배열을 연구하는 것만으로 선량당량을 1/3로 저감할 수 있다. 이것은 주목할만한 수치이며, 목표치도 될 수 있는 수치이다.

4. 맺는 말

최적차폐의 응용이 가능한 예로서 Fig. 6에 나타난 바와 같은 사용제(濟) 연료 수송용기(보통 캐스크라 함)의 차폐구조를 표시한다. 사용제연료에서는 감마선이나 중성자가 발생하므로 Fig. 6의 예에서는 감마선 차폐체로서 납, 중성자 차폐에는 물, 외통은 스테인레스 스틸로 되어 있어, 다중층이 되어 있다. 캐스크는 원자로 건물 안에서 크레인에 의한 이동이 가능할 것, 암벽 크레인에 의한 선박에의 적재, 하역이 용이할 것 등 중량 제한이 있다. 또한 작업원이나 일반대중에 대한 피폭을 최소한으로 하기 위해 캐스크 표면에서는 2mSv/h, 표면으로부터 1m의 위치에서는 0.1

mSv/h라는 수송 규칙상의 규제치가 있다. 이러한 사용환경하에 있기 때문에 캐스크의 차폐구조는 상당히 최적차폐에 가까운 구조가 되는 것 같지만, 재료의 배열을 최적화하면 보다 합리적인 캐스크의 설계가 가능할 것으로 사료된다. 기타의 원자력 시설에서는 최적차폐라는 개념은 거의 고려되어 있지 않다. 그러나 약간의 연구에 의해 선량 당량이 1/3으로 저감된다는 것은 크나큰 매력이지 않겠는가.

【參考文獻】

1. K. Ueki et al., "Systematic Evaluation of Neutron Shielding Effects of Materials." Nucl. Sci. Eng., 124, 455-464(1996).
2. K. Ueki and Y. Namito, "Optimum Arrangement for the Neutron Dose Rate of an Iron-Polyethylene Shielding System." Nucl. Sci. Eng., 96, 30-38(1987).