

고준위폐기물 처분용기 제작성 분석

Fabricability of the canister of high-level radioactive wastes

최희주, 전관식, 이 양, 조동건, 이종열, 최종원
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

가압경수로형 사용후핵연료 처분용기에 대한 개념설계 및 안전성분석이 완료되어 이를 상용화하기 위한 단계로서 처분용기의 국내 제작성을 분석하였다. 용기의 내부구조물 제작성 확인을 위하여 실규모 용기의 직경 1/2, 길이 1/5인 소규모 용기를 설계하였다. 직경에 비해 길이가 크게 줄어 구조시 예상되는 사용후핵연료 바스켓의 변형을 관찰하기에는 적합하지 않았으나 이에 대한 문제는 향후 용기 규모를 확대하며 해결하여야 할 것으로 판단되었다. 용기의 제작 공정에 대해 검토하고 결차를 수립하였다. 처분용기 내부구조물은 주조를 통해 제작할 계획이며, 이를 위한 주형을 개념을 제시하였다. 개념설계 된 소규모 용기에 대해 구조 해석을 수행하고, 구조 해석 결과로부터 시험용기의 강도 시험을 위한 시편 채취 위치를 선정하였다. 용기 제조 후 시험 방안을 수립하였다.

1. 서론

한국원자력연구소에서는 고준위폐기물 한국형처분시스템을 구성하는 인공방벽의 하나인 처분용기를 개발하고 있다. 국내 원자력발전소에서 발생하고 있는 사용후핵연료는 그 형태상 크게 가압경수로형과 CANDU형 2가지로 구분된다. 가압경수로형의 경우 각 발전소별로 그 형상의 차이가 약간은 있으나 1가지 형태의 처분용기를 이용하여 처분할 예정이다. 월성의 CANDU형 사용후핵연료는 구조가 크게 달라 별개의 용기를 개발하고 있다.

과거에 수행되었던 원자력중장기 2단계 연구[1, 2]를 통하여 개발된 처분용기는 2중 구조로 되어 있으며, 그 직경은 122 cm이다. 사용후핵연료를 포함한 이 용기의 중량은 대략 39톤에 이르며, 이와 같은 과도한 중량은 처분시설을 구성하는 취급 시스템의 설계를 매우 어렵게 하였다. 원자력중장기 3단계 연구에서는 처분용기 경량화를 위하여 용기 무게의 대부분을 차지하는 내부구조물(insert)의 크기를 최적화하기 위한 연구를 수행하였다[3]. 현재 진행 중인 3단계 연구결과 사용후핵연료 배열 방식에 따라 2가지의 처분용기 (KDC-1과 KDC-2; 그림 1 참조)를 개발하였다[4]. 개발된 처분용기는 기존의 용기에 비해 약 10톤 정도 가볍다. KDC-2 용기의 특성은 용기의 추가 감량이 가능한 구조이다.

3단계 연구를 통하여 개발된 처분용기(KDC-1)에 대하여 핵임계해석, 방사선 차폐해석, 구조해석, 열해석을 통하여 안전성을 분석하였으며, 안전성 분석결과 KDC-1 처분용기는 현재 고려되고 있는 지하 500 미터의 처분환경에서 그 안전성이 확인되었다. 개념설계 된 용기를 실용화하기 위해서는 그 제작성이 확인되어야 한다. 처분용기(KDC-1)가 비록 경량화에 성공하였으나 여전히 그 무게는 사용후핵연료를 포함한 경우 약 30톤 정도로 처음부터 실규모의 용기 제작에는 어려움이 있다. 처분용기 제작에 필요한 요소기술을 검토하기 위하여 실규모 용기에 비해 직경 1/2, 높이 1/5 크기의 용기를 설계하였다. 본 논문에서는 처분용기의 소규모 용기 제작 계획을 수립하였으며, 이를 통하여 처분용기 제작성을 검토하였다. 고준위폐기물 처분연구 수행 경험은 많은 스웨덴의 경우 처분용기 제작 경험이 가장 풍부하며, 2004년 초를 기준으로 20개의 내부구조

물과 34개의 외부 구리용기를 제작한 경험을 갖고 있다[5].

본 논문의 목적은 고준위폐기물 처분용기(KDC-1)의 소규모 용기 제작 계획을 수립하고 검토하는 것이다. KDC-1 처분용기를 고려하여 소규모 처분용기를 설계하였으며, 제작 절차를 분석하였다. 설계된 소규모 용기에 대한 구조해석을 NISA 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 해석결과로부터 제작 후 강도시험 시편 채취 지점 등을 결정하였다. 제작된 소규모 용기에 대한 시험 방안을 제시하였다.

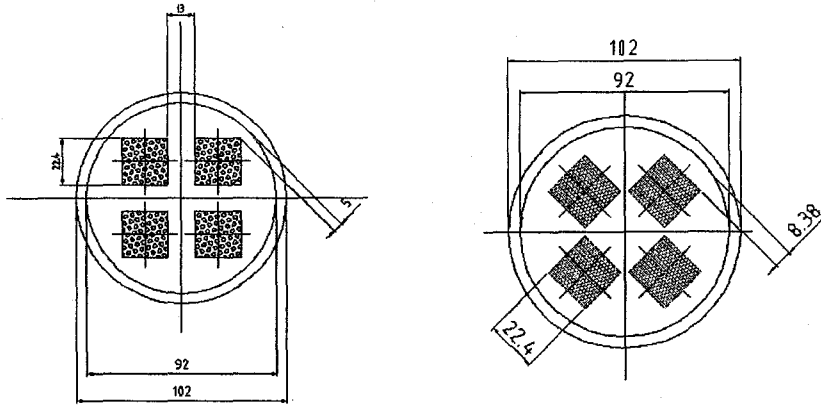


Fig. 1. Schematic of KDC-1 and KDC-2.

2. 용기구조 및 구조해석

본 연구에서 고려하고 있는 처분용기의 구조는 KDC-1 형태이며, 외부용기의 재질은 구리, 내부 구조물의 재질은 nodular cast iron이다. 소규모 용기를 제작하기 위해서는 실 규모 용기를 적절한 비율로 축소하여야 한다. 처분용기의 직경은 102 cm, 길이는 약 483 cm 이며, 바스켓 한 변의 길이는 22.4 cm 이다. 이와 같은 긴 구조물을 직경과 높이를 동일한 비율로 축소할 경우 사용후핵연료가 놓이게 되는 바스켓 부분이 너무 작게 된다. 따라서 본 연구에서는 소규모 용기의 중량 등을 고려하여 별다른 해석 없이 높이에 대해서는 1/5, 직경에 대해서는 1/2로 축소하여 제작하기로 결정하였다. 처분용기 내부구조물의 중량은 실 규모의 경우에는 15톤 정도이나 이와 같은 규모로 축소하여 제작할 경우 중량은 약 800 kg 정도이다.

소규모 용기의 제작 목적은 제작성을 확인하는 것 외에도 용기 제작 후 용기에 관련된 제반의 테스트를 수행하는 것이다. 처분용기가 갖추어야 할 가장 중요한 특성의 하나는 기계적 강도를 유지하는 것이며, 제작된 소규모 용기로부터 기계적 강도 시험 시편을 채취하기 위한 지점을 구조 해석을 통하여 결정하였다. 이를 위하여 소규모 용기의 내부구조물에 대한 구조 해석을 수행하였다. 용기의 구조 해석에는 유한 요소법을 이용하고 있는 NISA 프로그램을 이용하였다. 계산에 이용된 내부구조물의 기계적 특성은 표 1에 나타난 바와 같다. 내부구조물의 재료인 nodular cast iron의 경우 밀도가 다른 철강 제품에 비해 비교적 작은 7.2 g/cm^3 이다 [6]. 계산에 이용된 하중 조건은 KDC-1 설계에 이용하였던 정상 조건을 이용하였다(그림 2 참조). 정상조건으로는 지하수압 5 MPa과 완충재 팽윤압 7 MPa를 합한 12 MPa를 고려하였다. 그림 3에는 NISA 컴퓨터 프로그램을 이용하여 구조 해석에 이용한 유한요소 모델을 나타내었다. 구조해석 결과는

von-Mises stress와 변위를 이용하여 나타내었다. 계산 결과는 그 값의 크기보다는 최대 응력과 최대 변위가 발생하는 위치에 중점을 두었다. 구조해석 결과를 그림 4와 그림 5에 von-Mises stress와 변위로 나타내었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 계산 결과 사용후핵연료가 위치할 바스켓의 상하부에 응력이 집중되었다. 계산결과는 용기 제작 후 강도 시험을 위한 시편 채취 지점 결정에 활용되었다.

Table 1. Mechanical properties of KDC-1 canister material

Material	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Stress (MPa)
Nodular cast iron	7.200	162	0.3	235(at 100℃)

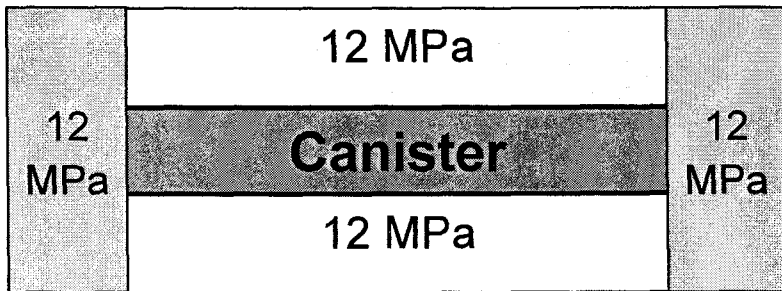


Fig. 2. Load condition used for the structural analysis.

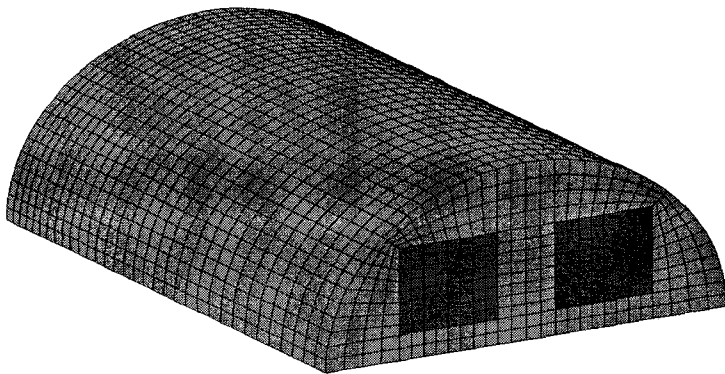


Fig. 3. Finite element model used for the NISA calculation.

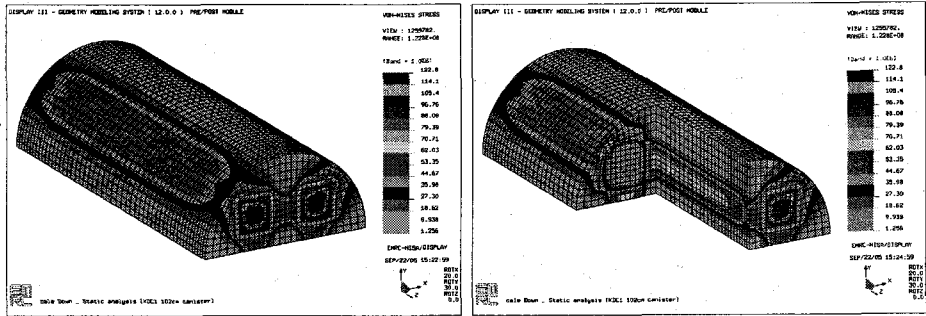


Fig. 4. von-Mises stress calculated with the NISA computer program.

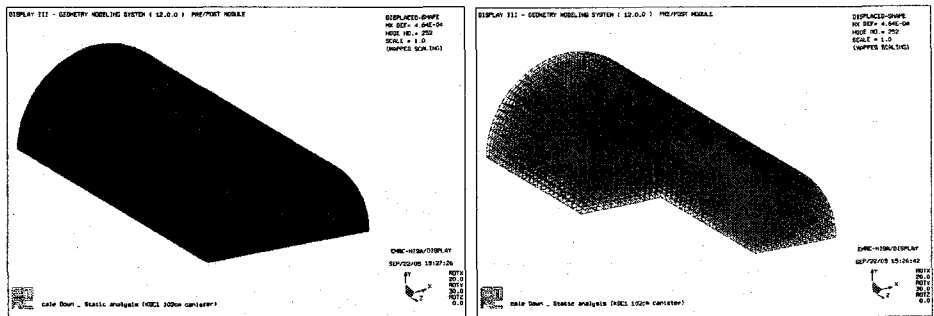
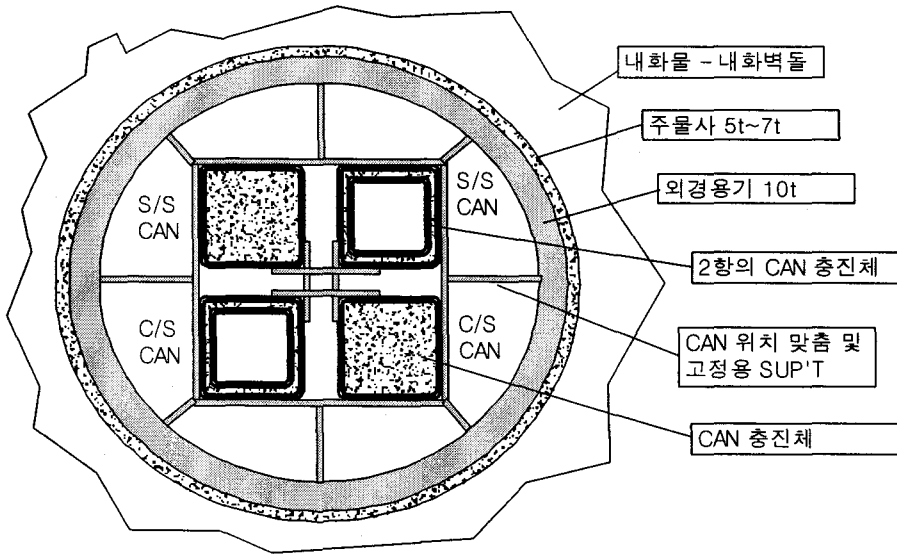


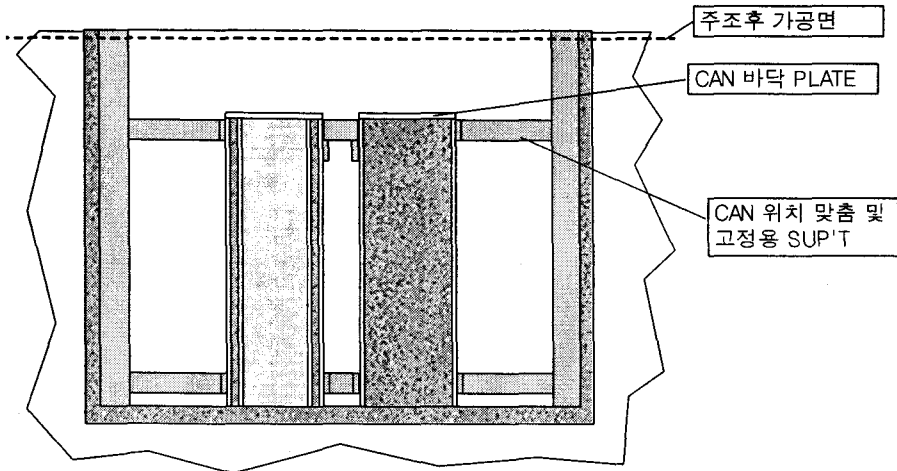
Fig. 5. Displacement calculated with the NISA computer program.

3. 용기 제작 방안

소규모 용기 제작을 위하여 먼저 내부구조물 제작 절차를 작성하였다. 내부구조물의 재료는 주 구조물은 nodular cast iron이며, 사용후핵연료를 넣는 바스켓은 스테인레스강이다. 용기는 주조를 통해서 제작한다. 용기의 외경에 대해 전면 가공을 고려하였으나 특별한 공차가 없을 경우 주조 전에 원주방향의 외형에 대해 탄소강판으로 용기를 제작하여 주조하는 방안이 고려되어 [7], 그림 6에 주어진 바와 같은 주형틀을 제시하였다. 그림 6에 주어진 바와 같이 제작된다면 처분용기 외경에 대하여 별도의 가공이 필요 없을 것으로 판단되었다. 외경 용기도 외부에 주물사를 두고 그 외피는 내화물로 용기를 만든다면 변형이 크지 않을 것으로 예상되었다. 사용후핵연료 바스켓의 재질로서 스테인레스강 외에 탄소강을 사용하는 방안을 검토하였다. 즉 4개의 사용후핵연료 바스켓 중 2개에 대해서는 탄소강을 이용하는 것을 시험하기 위하여 그림 6에 나타난 바와 같이 설계하였다. 주형틀 전반에 대한 개념도를 그림 7에 나타내었다. 그림 8은 소규모 용기 제작을 고려하고 있는 주형틀을 이용하여 주조를 하고 있는 현장 사진이다.



(a)



(b)

Fig. 6. A mould for the fabrication of a small scale canister [6].

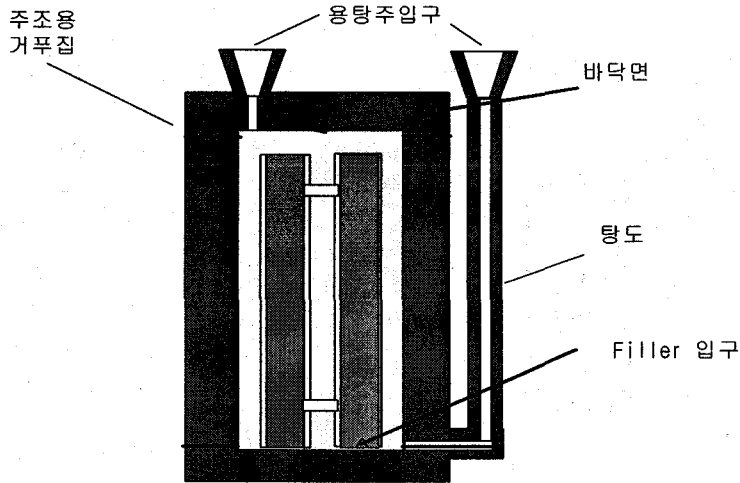


Fig. 7. Conceptual drawing of the mould for the small scale canister.

4. 용기 시험 방안

제작된 소규모 용기의 특성을 분석하기 위하여 비파괴 검사, 용기 시편에 대한 인장 및 피로도 검사, 재료 분석 등을 계획하였다. 용기 재료의 균일성 분석을 위해서 화학 분석과 현미경을 이용한 성분 분석을 수행할 예정이다. 내부 구조물의 경우 용접 부위가 없어 비파괴 검사의 경우 주조시 발생할지 모르는 취약 부분의 검사 및 기포 등의 생성 여부를 확인하는 데에 중점을 둘 예정이며, 여러 가지 비파괴 검사 중 초음파를 이용한 방법이 가장 적절한 것으로 판단되었다. 초음파를 이용한 비파괴 검사는 주로 용기 외부를 대상으로 수동과 자동으로 수행할 예정이며, 용기의 내부에 대해서는 시편을 절단하고 이에 대해 수동으로 수행할 예정이다.

처분용기 내부구조물이 갖추어야 할 가장 중요한 특성은 기계적 강도이다. 주조 과정에서 요구되는 강도가 얻어지는 지를 확인하기 위하여 가장 많은 응력이 발생할 것으로 판단되는 지점을 컴퓨터 모사를 통하여 결정하였으며, 이 지점에서의 강도 측정을 위하여 용기를 절단하여 인장 강도 측정 시편을 제작할 계획이다. 인장강도와 함께 경도 시험을 수행할 예정이다. 그림 9는 핀란드에서 현재 개발 중인 처분용기를 시제품으로부터 시편을 절단하는 모습이다 [8].

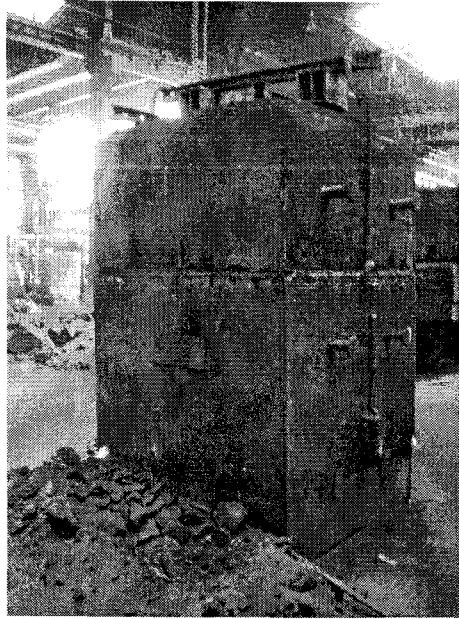


Fig. 8. A picture of the mould for the small scale canister.

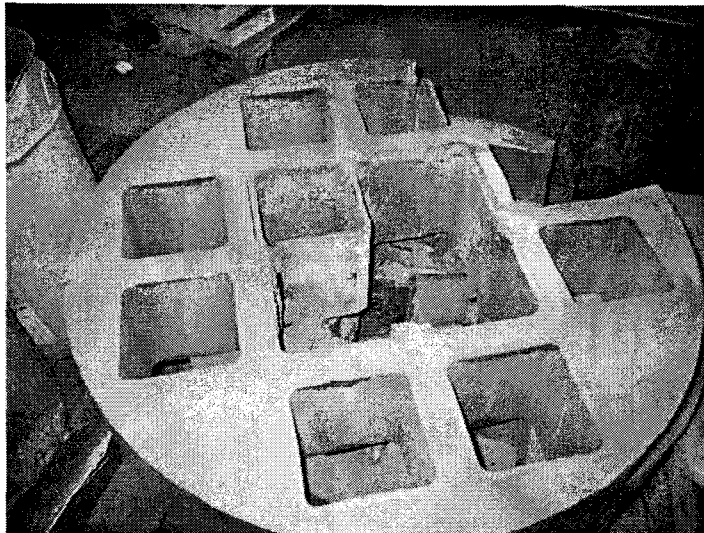


Fig. 9. Preparation of samples for tensile strength from the canister[POSIVA WR 2003-59].

5. 결론

가압경수로형 사용후핵연료 처분용기에 대한 개념설계 및 안전성분석이 완료되어 이를 상용화하기 위한 단계로서 처분용기의 국내 제작성을 확인하고자 하였다. 소규모 용기 제작을 위하여 실규모 용기의 직경은 1/2, 길이는 1/5인 소규모 용기를 설계하였다. 직경에 비해 길이가 크게 줄어 주조시 예상되는 사용후핵연료 바스켓의 변형을 관찰하기에는 적합하지 않았으나 이에 대한 문제는 향후 용기 규모를 확대하며 해결하여야 할 것으로 판단되었다. 용기의 제작 공정에 대해 검토하고 절차를 수립하였다. 처분용기 내부구조물의 제작은 주조를 통해 제작할 계획이며, 이를 위한 주형틀 개념을 제시하였으며 국내 제작성을 현장 실사를 통해 점검하였다. 개념설계된 소규모 용기에 대해 구조 해석을 수행하였다. 구조해석 결과로부터 시험용기의 강도 시험을 위한 시편 채취 위치를 선정하였다. 용기 제조 후 시험 방안을 수립하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 시행한 원자력 중장기 연구사업의 일환으로 수행되었습니다. 또한 용기제작 절차 등 결정에 많은 경험을 나누어 주신 두산중공업의 권태호님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kang, C. H. et al., High-Level Radwaste Disposal Technology Development, KAERI/RR-2236/2002 (2002)
2. 최종원, 전관식, 최희주, 조동건, 한필수, 사용후핵연료 처분용기(KDC-1)의 예비개념설계연구, KAERI/TR-2936/2005 (2005).
3. Heui-Joo Choi, Yang Lee, Dong-Keun Cho, Jong Youl Lee, and Jongwon Choi, Mechanical Dimensioning of the Canister Insert for PWR Spent Fuels, 2005 춘계 한국원자력학회 학술발표회 (2005)
4. 최희주, 이종열, 조동건, 이양, 김성기, 최종원, 사용후핵연료 배열을 개선한 고준위폐기물 처분용기 개발, 2005년도 춘계 한국방사성폐기물학회 학술발표회 (2005).
5. Andersson, G-G., Peter Eriksson, Marika Westman, and Goran Emilsson, Status report, canister fabrication, SKB TR-04-23 (2004).
6. Lars Werme, Design premises for canister for spent nuclear fuel, Technical Report TR-98-08 (1998).
7. 권태호, personal communication (2005).
8. Heikki Raiko, Test Manufacture of a Canister Insert, POSIVA Working Report 2003-59 (2003).