

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

금속전환체 건식저장을 위한 MVDS 시스템
개념설정 및 열수력해석 평가

Conceptual Assessment and Thermal Hydraulic Analysis of
MVDS System for the Dry Storage of Reduced Metal Fuel

이주찬, 방경식, 신희성, 주준식, 서기석, 김호동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

기존의 저장방식에 금속전환체 적용성 분석을 위하여 MVDS 저장시스템 개념평가 및 열수력해석을 수행하였다. 건식저장 개념 평가에서는 최적 중량 및 체적, 냉각 효율성 측면을 고려하여 기존의 PWR 저장방식에 비하여 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 저장모델을 설정하였다. MVD 저장시스템에 대한 열해석 결과 정상운전조건에서 금속전환체 연료봉의 최대 온도가 110 °C로 계산되어 허용온도보다 낮게 나타났다. 따라서 열안전성 측면에서 MVDS 저장방식에 금속전환체의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract

Conceptual assessment and thermal hydraulic analysis of MVDS storage system have been carried out for application of reduced metal fuel. The storage concept was established considering the optimum weight, storage volume and thermal efficiency. The capacity of MVDS system for loading the reduced metal fuel has four times as compared with existing PWR fuel storage system. In the results of thermal analysis, the maximum temperature of metal fuel was estimated to be 110°C which is lower than the allowable value under normal operation condition. Therefore, it is shown that the MVDS system can feasibly accommodate the reduced metal fuel in aspect of thermal safety.

1. 서론

원자력연구소에서는 PWR 사용후핵연료를 건식 개질함으로써 관리 부피를 줄이고 안전상에 문제를 일으키는 고방사성 핵종인 세슘과 스트론튬 등을 선택적으로 제거하여 방사능 및 냉각부하를 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정개발에 대한 연구를 수행하고 있다. 이는 세라믹 형태의 PWR 핵연료를 금속으로 전환시켜 관리하는 방법으로 금속전환체는 PWR 사용후핵연료와 비교하여 체적, 방사능 및 발열량을 약 1/4로 줄일 수 있는 이점이 있다[1].

사용후핵연료 저장방식은 크게 건식 및 습식 저장방식으로 구분되며, 건식 저장방식은 주로 소내 저장시설과 재처리 시설을 연계한 소외 저장시설에서 이용된다. 습식저장은 일정기간 소내 저장시설에서 보관 관리하던 핵연료를 소내 저장시설의 저장용량 한계를 극복하기 위한 수단으로 임시 중간 저장하는 경우에 주로 이용되며, 최근에는 안전성 측면에서 이점이 있는 건식 저장방식이 널리 이용되고 있다. 특히, 사용후핵연료 금속전환체는 물 또는 수증기와 반응하면 수소 또는 수소화물이 생성되어 반드시 건식 저장방식이 적용되어야 한다.

금속전환체의 특성을 고려하면 기존 사용후핵연료 저장시설에 금속전환체를 적용할 경우, 동일한 시설에 최대 4배의 저장용량 증대 효과를 갖는다. 하지만 금속 핵연료의 저장 허용온도가 PWR 핵연료에 비하여 훨씬 낮기 때문에 저장용량을 4배로 증대시 금속연료의 저장 허용온도를 유지하기 위한 열안전성 평가가 매우 중요하다.

사용후핵연료 저장방식은 금속용기, 콘크리트 용기, 콘크리트 모듈 및 볼트저장방식으로 구분되며, 이들 4가지 저장방식중 냉각효율이 가장 뛰어난 것으로 알려진 볼트 저장방식에 대한 금속전환체 적용성을 평가하였다. 대표적인 볼트 저장방식중 하나인 MVDS 저장방식에 금속전환체 적용을 위하여 최적 저장개념을 설정하였으며, Fluent[2] 전산코드를 이용하여 금속전환체 저장시스템에 대한 열수력해석을 수행하였다.

2. MVDS 저장시스템 개념설정

MVDS(Modular Vault Dry Storage) 방식은 그림 1과 같이 콘크리트 구조물로 건설된 독립 건물 내에 사용후핵연료 저장 캐니스터를 수직으로 저장하는 방식으로 저장관에 1개씩의 연료를 저장하도록 되어있다. MVDS 방식은 콘크리트 볼트 모듈, 저장 컨테이너 및 냉각계통 등으로 구성되며, 핵연료를 인수하고 저장 볼트 모듈로

운반하기 위한 이송용기 및 컨테이너 취급장치 등이 필요하다. 콘크리트 건물은 방사선차폐 안전성을 보장하며, 저장 컨테이너는 격납 안전성을 보장하게 된다.

이 방식은 미국, 영국, 헝가리 등에서 인허가를 받아 사용중인 방식으로 현재 운영중인 시설은 MAGNOX, HTGR 및 VVER 연료 등 다양한 핵연료를 대상으로 하고 있다. 가압경수로 및 비등경수로와 같은 경수로 연료에 대한 볼트방식 적용은 1988년에 인허가를 받은 바 있으나 현재까지 적용된 사례는 없다. 제작사로는 미국의 Foster Wheeler 영국의 GEC-Alsthom 사가 있다. 이 방식은 연료의 저장 허용 온도에 있어서 많은 여유도를 갖도록 설계되어 있어서 단기 냉각기간의 연료도 저장이 가능하고 방사선 준위를 낮게 할 수 있는 이점이 있다. 특히, 외부 차폐체의 두께 증가가 시설의 냉각능력에 영향을 주지 않으므로 냉각능력 및 방사선 차폐 측면에서 타 방식에 비하여 유리한 측면이 있다.

기존 MVDS 시스템에 금속전환체 적용성 분석을 위하여 금속전환체의 저장 효율성을 고려한 연료봉 배열 및 단위저장 캐니스터를 결정하였다. 금속전환체의 기준 핵연료는 연소도 48,000 MWD/MTU, 초기 농축도 4.5 wt.%, 냉각기간 10년인 PWR 핵연료를 고려하였다. 금속전환체 체적을 최소화하기 위하여 연료봉 직경이 크고 및 길이가 길수록 유리하지만 핫셀 내부에서 취급여건을 고려하여 950 mm로 하였으며, 연료봉 직경은 68 mm로 결정하였다.

금속전환체 단위저장 캐니스터는 열전달 효율을 증대시키고 중량을 최소화시키기 위하여 알루미늄 재질을 사용하였으며, 알루미늄 봉에 금속 연료봉을 끼워 넣는 구조로 하였다. 위와 같이 알루미늄 봉에 구멍을 뚫어 연료봉을 장전할 경우 열전달 효율 측면에서 유리하며, 캐니스터의 구조적 건전성 측면에서도 이점이 있다. 그림 2는 단위저장 캐니스터를 나타내고 있으며, 육각형 알루미늄 봉에 직경 69 mm 깊이 955 mm의 구멍을 뚫어 7개의 연료봉을 장전할 수 있다. 연료봉이 끼워지는 구멍 사이의 간격을 5 mm로 고려하여 체적 및 중량을 최소화하였다. 단위저장 캐니스터의 용량은 PWR 핵연료집합체 1개에 상당하는 금속전환체가 장전할 수 있으며, 총 중량은 490 kg, 길이는 1 m로 설정하였다. 단위저장 캐니스터 내부에는 불활성 기체인 헬륨가스를 채우며, 뚜껑은 용접방식으로 체결하여 캐니스터 자체가 1차 격납 경계를 갖도록 하였다.

MVDS 저장모델은 1987년도에 미국의 FWEC(Foster Wheeler Energy Corporation)사에서 NRC에 제출하였던 보고서를 기준으로 하였다. 이 방식은 1개의 볼트 모듈에 83개의 저장 컨테이너를 수납할 수 있으며, 1개의 저장 컨테이너에 1다발의 PWR 핵연료를 저장할 수 있다. PWR 핵연료를 금속전환할 경우 발열량 및 냉각부하가 약 1/4로 줄어들며, 기존 PWR 저장방식에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체 저장모델을 설정하였다.

그림 3은 금속전환체 저장 컨테이너를 나타내며, 1개 저장 컨테이너에 4개의 금

속전환체 단위저장 캐니스터를 4단으로 적재할 수 있다. 컨테이너는 10 mm 두께의 스테인레스강으로 구성되며, 외형 치수는 외경이 265 mm이고 길이가 4,650 mm로 금속전환체 장전시 컨테이너의 총 중량은 약 2.4톤이다. 저장 컨테이너 뚜껑은 용접방식으로 밀봉되어 격납 건전성이 유지되도록 하였고 차폐플러그를 설치하였다.

MVDS 저장모델은 그림 4와 같이 강화콘크리트 구조물인 볼트 모듈내에 금속전환체를 저장하는 컨테이너와 컨테이너를 둘러싸고 있는 콘크리트 및 철판구조물 (Charge Face Structure), 상부구조물(Charge Hall), 수송용기로 부터 사용후핵연료를 차폐 저장관까지의 이송하기 위한 핵연료 취급장치 및 이송크레인으로 구성된다.

저장용량은 기존의 PWR 저장방식과 마찬가지로 1개의 볼트에 83개의 컨테이너를 수직으로 끼워 넣는 구조로 하였으며, 1개의 컨테이너에 4개의 단위저장 금속전환체 캐니스터를 장전할 수 있도록 하여 1개의 볼트 모듈에 PWR 핵연료를 기준으로 332다발에 상당하는 금속전환체를 저장할 수 있도록 설정하였다.

볼트 모듈은 금속전환체 저장 컨테이너를 차폐시키고 냉각공기의 유로를 형성시켜주며, 콘크리트 벽 두께 및 볼트의 공간 치수를 기존의 PWR 핵연료 저장시스템과 동일하게 하여 저장 용량만 4배로 증대시켰다. 컨테이너가 끼워지는 bore-hole은 직경 270 mm이며, 삼각형 배열을 갖는 pitch 486 mm로 하였다. 냉각공기는 공기 흡입구의 스크린을 통하여 볼트 모듈로 들어오며, 이 스크린은 이물질의 유입을 방지하는 역할을 하며, 냉각공기의 유로를 미로 구조로 하여 방사선차폐 기능이 유지되도록 하였다. 붕괴열 제거방식은 자연대류 방식을 이용하며, 모든 모듈이 하나의 취급 건물별로 지원을 받을 수 있도록 하여 저장 컨테이너를 모듈식으로 증설할 수 있도록 하였다.

3. 열수력해석

사용후핵연료 저장시설은 핵연료의 최초 저장시 잔열을 제거할 수 있는 냉각계통을 갖추어야 한다. 잔열 제거계통은 저장된 핵연료와 피복관의 온도가 규제기관의 권고치 또는 승인치를 초과하지 않도록 충분한 냉각능력을 확보하고, 모든 설계기준 사고조건에서도 그 기능을 유지하여야 한다[4]. MVDS 저장시스템의 냉각방식은 공기 입출구 사이의 높이차와 온도차로 인한 굴뚝효과가 이용하여 공기순환을 통한 자연냉각 방식을 사용한다. 공기순환에 의하여 금속전환체 저장 컨테이너를 냉각할 수 있도록 충분한 유량을 공급할 수 있는 유로 형상을 갖도록 하였다.

열수력해석은 볼트 모듈 내부의 자연대류 냉각계통에 대한 유동해석을 통하여 유동장에 대한 온도분포 및 내부에 설치된 저장 컨테이너의 외벽온도를 구한 후 컨테이너 내부에 대한 열전달해석을 수행하여 금속전환체의 온도분포를 계산하였다.

금속전환체의 기준 핵연료는 연소도 48,000 MWD/MTU, 초기 농축도 4.5 wt.%, 냉각기간 10년인 PWR 핵연료를 기준으로 하였으며, PWR 핵연료집합체 1개에 해당하는 금속전환체의 붕괴열은 180 W로 고려하였다. 저장용량은 1개 모듈에 83개의 저장 컨테이너, 1개의 컨테이너에 4개의 금속전환체를 저장할 수 있도록 하여 총 332개의 단위저장 금속전환체를 고려하였으며, 냉각부하는 총 59.76 kW로 고려하였다.

콘크리트 차폐체는 열전도율이 낮고 두께가 약 1m 정도로 비교적 두껍기 때문에 열해석 모델에서는 콘크리트 벽을 통한 열전도를 무시하고 단열조건을 적용하였다. 저장시설의 정상운전조건에서 환경온도는 연평균 대기온도를 적용하며, 열전달에서 볼트로 유입되는 공기의 온도를 27 °C로 고려하였다. 볼트 내부공간의 저장 컨테이너 주변을 순환하여 가열된 공기를 효율적으로 방출시키기 위하여 굴뚝 높이를 25 m로 고려하였다.

그림 5는 볼트 내부에 대한 유동해석 결과를 나타내며, 캐니스터 외벽의 최고온도는 92 °C로 계산되었고 굴뚝을 통하여 외부로 방출되는 공기의 온도는 38 °C로 계산되었다. 그림 6은 유동장에 대한 속도벡터를 나타내며, 볼트 내부에서 공기의 최대 유속은 2.1 m/s로 계산되었다.

컨테이너 외벽의 온도 92 °C를 경계조건으로 고려하여 컨테이너 내부의 금속전환체에 대한 온도분포를 계산하였으며, 저장 컨테이너의 내부에는 헬륨가스가 채워진 조건을 고려하였다. 그림 7은 컨테이너 내부의 온도분포를 나타내며, 금속전환체 연료봉의 최대 온도는 110 °C로 계산되었다. 저장 컨테이너 재질을 열전도율이 좋은 알루미늄 재질을 사용하고 저장 컨테이너 내부의 공간을 최소화함으로써 열전달 효율을 증대시켜 컨테이너 외벽 온도와 컨테이너 내부의 연료봉 온도차가 비교적 작게 나타났다.

금속전환체의 저장 허용온도 기준이 없어 금속 연료인 Magnox 연료를 참고로 하여 허용온도 기준을 평가하였다. Magnox 연료의 정상운전조건에 대한 저장 허용온도는 CO₂ 분위기에서는 365 °C, 공기 분위기에서는 150 °C로 제시하고 있다[5]. 장기저장 동안 완전한 기밀 유지를 보장할 수 없기 때문에 공기분위기로 가정하여 저장 허용온도를 설정하며, 정상운전조건에서는 150 °C, 비정상 또는 사고조건에서는 200 °C로 적용하고 있다. 사고조건 허용온도 200 °C는 마그네슘 피복관이 손상되어 우라늄이 노출될 경우 우라늄의 발화온도(건조된 공기분위기 : 300 °C, 포화 공기분위기 : 250 °C)를 기준으로 보수적으로 설정된 온도이다[6]. 금속전환체는 불활성 기체 분위기 상태로 저장된다면 정상운전조건에서 연료봉의 열적 건전성에는

별 문제가 없을 것으로 판단되나, 장기저장 기간동안 완전한 기밀이 유지된다고 보장할 수 없기 때문에 불활성 기체 분위기에서 저장할지라도 보수적으로 가정하여 공기분위기로 가정한 연료의 허용온도 설정이 필요하다. 따라서 Magnox 연료의 저장 허용온도를 참고하여 금속전환체의 저장 허용온도를 정상운전조건에서 150 °C, 비정상 또는 사고조건에서는 200 °C를 기준으로 평가하였다.

금속전환체 저장 컨테이너 내부에 헬륨가스가 채워진 정상운전조건에서 연료봉의 최대온도가 110 °C로 계산되어 정상운전조건에서의 허용온도로 설정된 150 °C보다 낮게 나타났다. 금속전환체의 격납경계를 이루는 단위저장 캐니스터 및 저장 컨테이너가 파손되어 공기가 채워진다고 가정한 조건에서 연료봉의 최대온도는 151 °C로 계산되었으며, 이 온도는 사고조건시 허용온도 200 °C보다 낮으므로 금속 연료의 발화는 발생하지 않을 것으로 판단된다. 이상의 결과로 보아 MVDS 저장방식에 금속전환체를 적용할 경우 열안전성 측면에서 PWR 핵연료 대비 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PWR 핵연료를 저장할 수 있는 MVDS 저장방식에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체 적용을 위한 저장모델을 설정하였으며, 금속전환체 저장시스템에 대한 열수력해석을 수행하였다. 금속전환체 단위저장 캐니스터는 알루미늄 재질을 사용하여 체적 및 중량을 최소화하고 열전달 효율을 증대시켰으며, 기존의 PWR 핵연료 저장시스템과 동일한 공간 내에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체 건식저장모델을 설정하였다. 금속전환체의 정상운전조건에 대한 저장 허용온도를 보수적인 관점에서 150 °C로 설정하였으며, MVDS 저장방식에 금속전환체 적용시 연료봉의 최대온도는 110 °C로 계산되었다. 또한, 저장 컨테이너가 파손되어 공기가 유입된 조건에 대한 연료봉 최대온도는 151 °C로 계산되어 가상사고조건에서도 연료의 발화는 발생하지 않을 것으로 예측되었다. 따라서 열안전성 측면에서 기존의 MVDS 저장방식에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] J. C. Lee, etc., "Evaluation for the Application of Metal Fuel in the Spent Fuel Dry Storage System", Proceeding of KNS Spring Meeting, 2001.
- [2] "FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 5", Fluent Inc., 1998.
- [3] "Topical Report for the Foster Wheeler Modular Vault Dry Store for Irradiated Nuclear Fuel", FW Energy Applications Inc., 1987. 10.
- [4] IAEA Safety Series No. 116, "Design of Spent Fuel Storage Facilities", 1994.
- [5] Schneider K. J. et al., "Foreign Experience in Intended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel", PNL-SA-20430, PNL, 1992.
- [6] Maxwell E. O. and D. Deacon, "Operating Experience of Vault Type Dry Storage and Its Relevance to Future Storage Needs", Paper Prepared for the Specialist Workshop on Techniques for Dry Storage of Spent Fuel Elements, Nuclear Energy Agency, 1982.

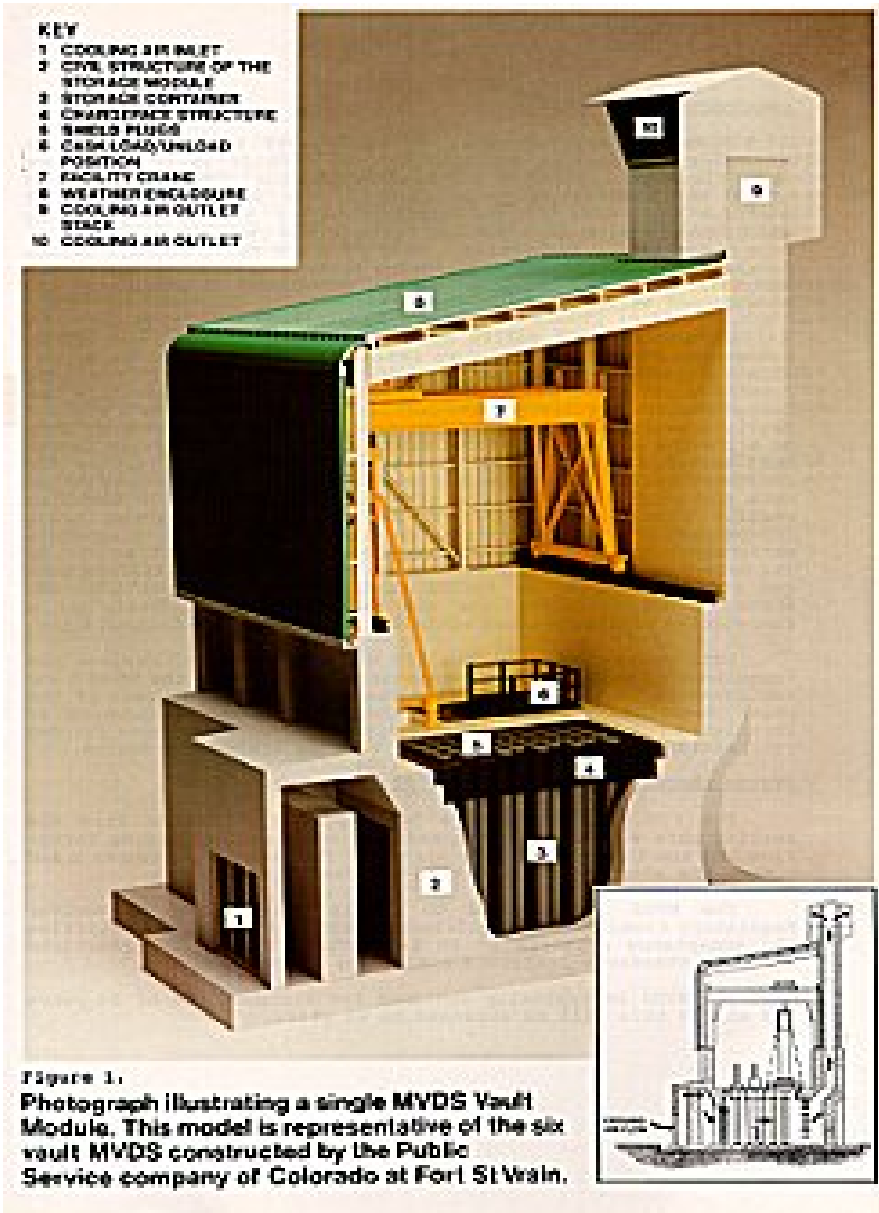
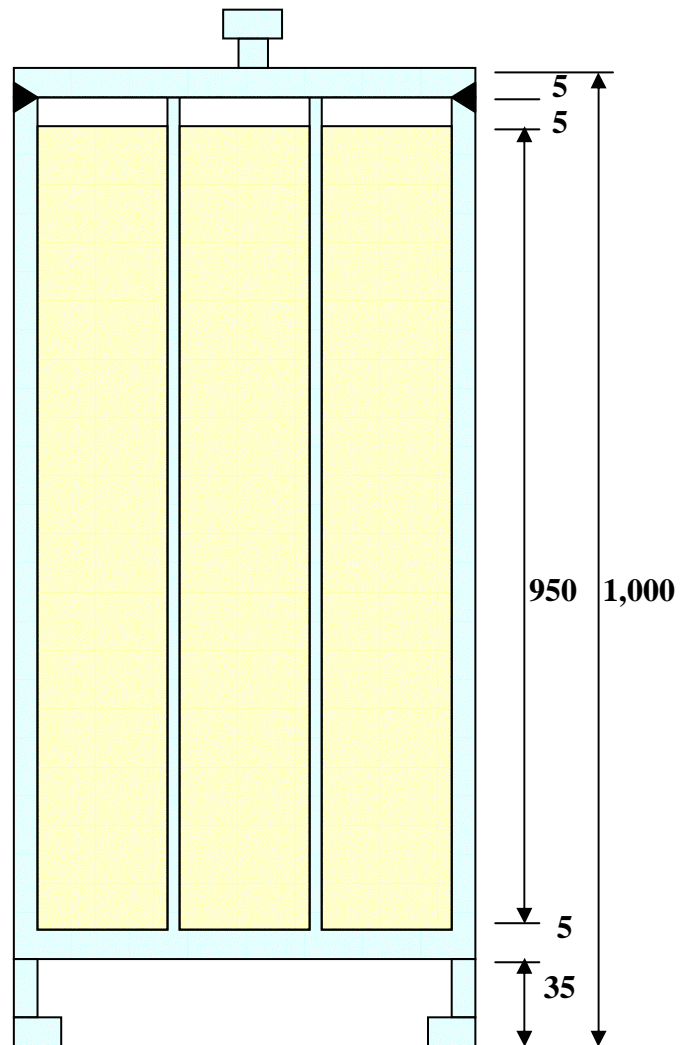
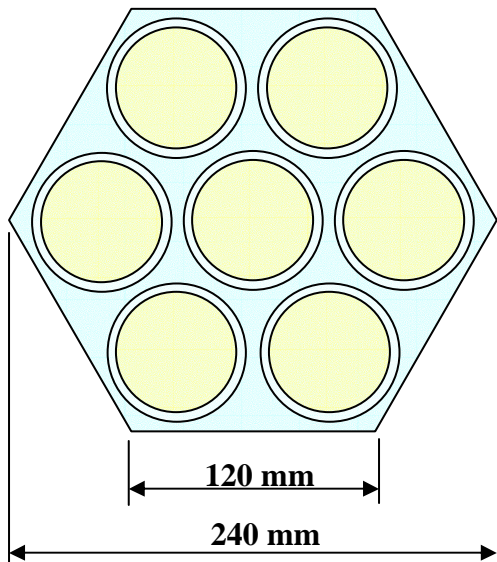
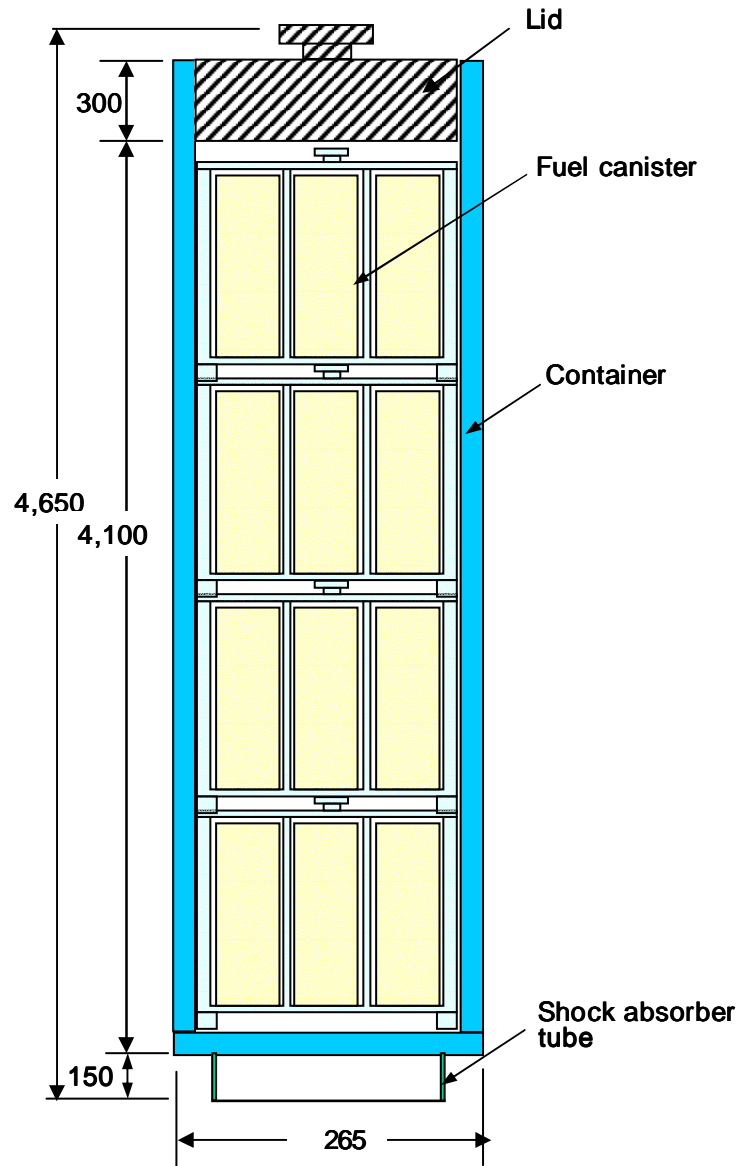
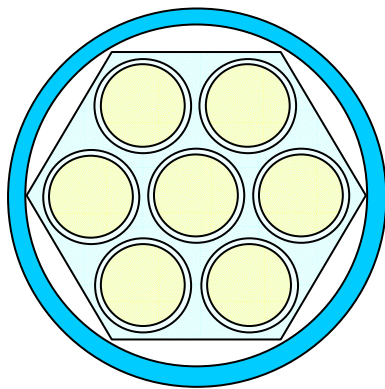


Fig. 1. Modular Vault Dry Storage.



Metal rod	
- Diameter	68 mm
- Length	950 mm
- Weight	65.7 kg/rod
Fuel canister	
- Width	120 mm
- Total length	1000 mm
- Hole	Ø 69 x 955 mm L
- Distance (holes)	5 mm
- Weight	490 Kg
- Storage capacity	1 PWR / canister

Fig. 2. Storage Canister for Reduced Metal Fuel.



Container	
- Outer diameter	265 mm
- Inner diameter	245 mm
- Thickness	10 mm
- Length	4,650 mm
Weight	
- Fuel (canister)	1,960 kg
- Container	400 kg
- Total	2,360 kg
Storage capacity	4 Canister (4 PWR)

Fig. 3. Storage Container for MVDS.

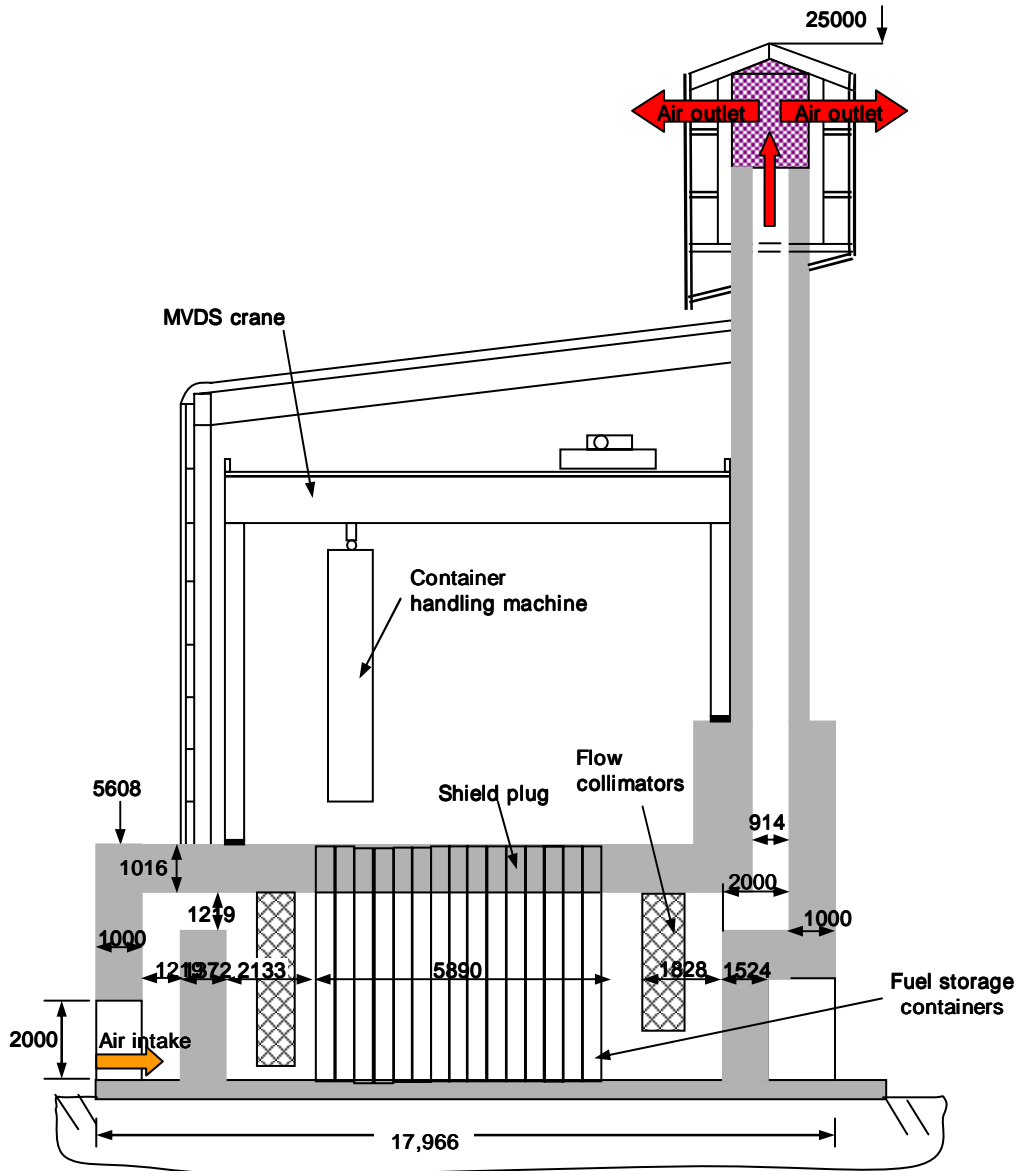
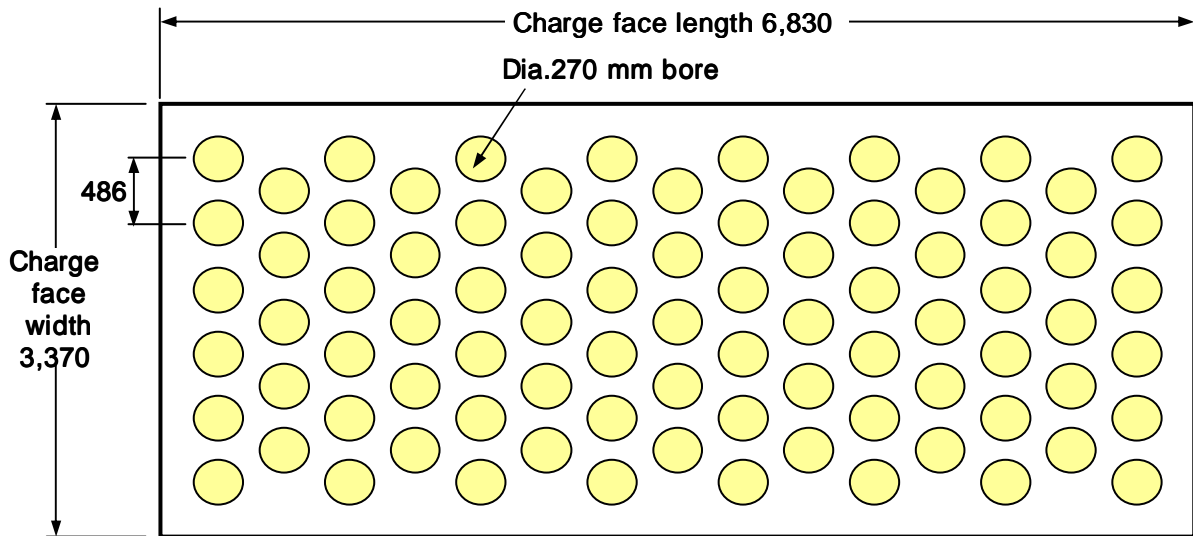


Fig. 4. MVDS System for Reduced Metal Fuel.



Charge face - Length - Width	6,830 mm 3,370 mm
Borehole arrays - Diameter - Pitch	270 mm 486 mm(triangular)
Chimney (height)	25 m
Storage capacity	83 container / vault (332 PWR fuel)

Fig. 5. Charge Face Structure for MVDS System.

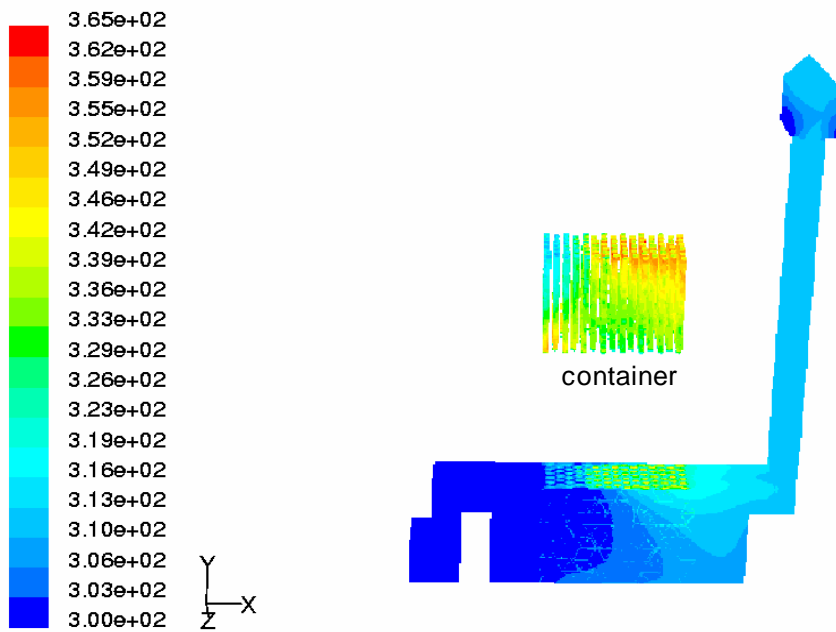


Fig. 6. Temperature Contour for MVDS [K].

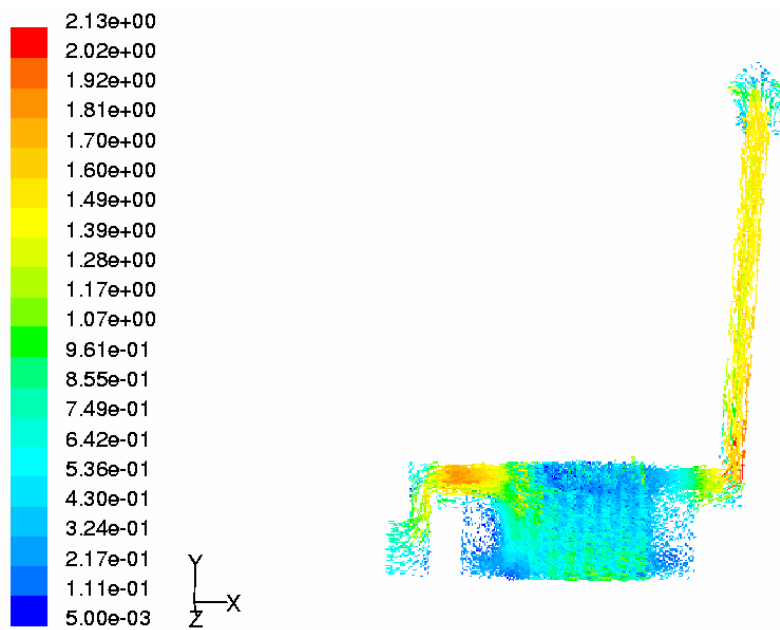


Fig. 7. Velocity Vector for MVDS [m/s].

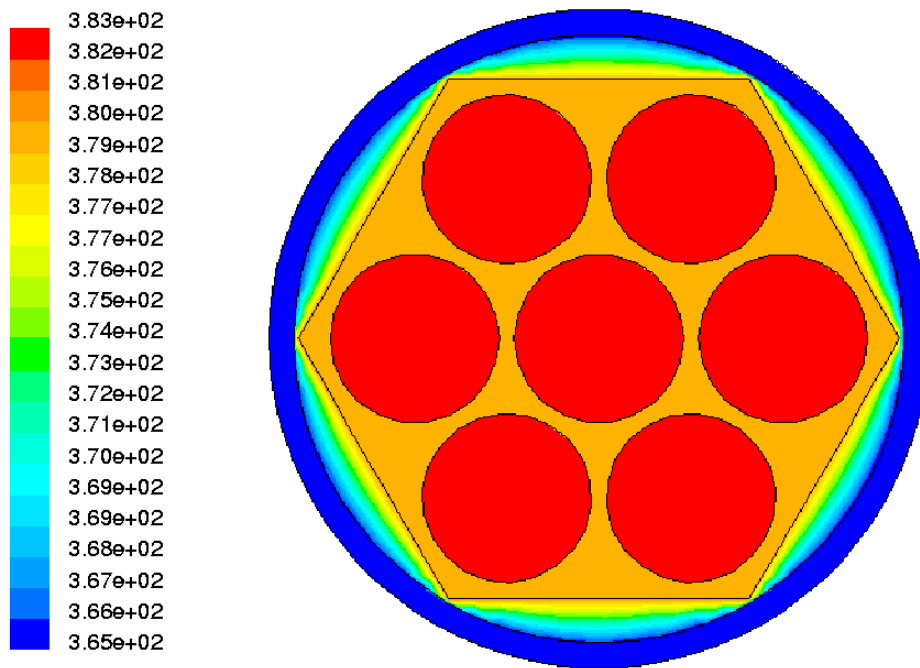


Fig. 8. Temperature Contour for Storage Container.