

SMART를 이용한 원자력 해수담수화 플랜트 개발

Development of A Nuclear Desalination Plant using the SMART

강한욱, 박홍준, 황영동, 이두정, 장문희

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지 사서함 105

요 약

원자력 해수담수화는 해수를 담수화하기 위해 사용되는 에너지를 기존의 화석연료에서 원자력으로 대체하는 것이다. SMART 열병합 발전-담수 플랜트는 열 에너지를 가장 효율적으로 사용하는 것을 목적으로 하기 때문에 증발법을 이용하는 MSF와 MED를 대상으로 다양한 연계방식에 대하여 열 역학적인 민감도 분석을 수행하였다. 담수플랜트의 성능비의 변화에 따른 담수생산단가를 분석하여 최적 성능비를 결정하였다. 또한 원자로에서 발생한 방사성 물질에 위한 담수플랜트의 오염방지를 위해 설치된 steam transformer를 포함한 SMART 발전-담수 플랜트의 열평형을 계산하였으며, 담수 및 연계계통에서 발생 가능성이 있는 사고 및 과도현상이 SMART의 안전성에 미치는 영향을 bounding approach에 의하여 평가하였다.

Abstract

Nuclear desalination simply replaces the fossil fuels used for seawater desalination as a nuclear energy. Since the SMART co-generation plant aims at the most effective use of thermal energy produced by SMART, the desalination process and the coupling method were determined through the thermodynamic analysis for the evaporation process, MSF and MED, and the various coupling method. The performance ratio of the SMART desalination plant was optimized through the sensitive analysis on water production cost with the performance ratio. Also thermodynamic energy balance calculation was performed on the SMART secondary cycle coupled with the desalination plant including steam transformer. In addition, the safety impact of the transients induced by the desalination plant was evaluated through the bounding approach of the key safety parameters of these transients.

1. 서론

해수 담수화는 해수의 화학적 성질을 물리적인 힘으로 그 성분을 분류하는 과정이다. 즉, 해수라는 용액으로부터 용매인 담수를 분리하고, 담수 이외의 성분은 농염수(Brine)로 농축되게 하는 단위조작이다.[1,2] 이러한 과정에서 해수를 물리적으로 분류하기 위해 열 또는 전기 등의 에너지를 필요로 하는데 현재 사용되는 에너지는 대부분 석탄, 석유 등 화석연료에 의존하고 있다. 그러나 최근에는 화석연료의 사용에 따른 대기오염 문제와 안전성이 대폭적으로 향상된 중소형 신형원자로의 개발로 원자력 에너지를 이용하는 열병합 해수담수화 플랜트에 대한 관심이 증대하고 있다. 우리 나라도 발전 및 담수생산을 위한 열병합 발전을 목적으로 열출력 330MWt인 일체형원자로 SMART를 개발 중에 있다. SMART 발전-담수 플랜트는 약 90MWe의 전기와 40,000 m³/day의 담수를 생산하여 인구 10만 명이 거주하는 지역에 공급하는 것을 목표로 하고 있다.[3,4]

발전-담수 복합플랜트는 크게 세가지 구성요소, 즉 에너지원, 발전계통, 담수화 계통으로 구성된다. 발전 및 담수생산 열병합 플랜트는 1) 증기를 발전에 사용하고 일부증기의 추출 또는 배출되는 증기를 담수생산에 사용함에 따른 열효율의 증대, 2) 발전과 담수 플랜트의 동시 건설에 따른 에너지원의 용량 증대 효과, 3) 설비 공유함에 따른 경제적 효과 등의 장점이 있다. 원자력 에너지를 열원으로 이용하는 해수 담수 플랜트 건설에 있어서 가장 큰 기술적인 문제는 기존의 전력생산을 위한 이차계통과 담수계통의 연계문제이다. 현재 다양한 방식의 담수 공정이 개발되어 있으며 SMART와 담수 계통의 연계방법은 원자력 에너지를 이용하는 데에 따른 경제적인 장점을 유지하면서 발전 및 담수생산을 위한 열병합 발전에 의해 부과되는 다양한 운전 및 안전성 관련 요건들은 만족할 수 있어야 한다[6~9].

본 연구는 SMART를 이용한 원자력 해수담수화 플랜트의 전기 및 담수생산 요건을 만족하는 최적의 연계방법 및 담수플랜트의 최적화에 관한 연구를 수행하였다. 다양한 연계방법에 대한 열 역학적인 분석을 수행하여 SMART에 연계할 담수 공정 및 연계 방법을 선정하였다. 또한 담수플랜트의 경제성 평가를 수행하여 담수플랜트의 성능비를 최적화 하였으며 담수계통의 사고 또는 운전 과도현상이 SMART의 안전성이 미치는 영향을 평가하였다.

2. SMART 열병합 발전-담수플랜트의 최적화

2.1 SMART와 담수 공정의 연계방법

SMART를 이용한 발전-담수 열병합 플랜트는 원자로(SMART), 발전계통 및 담수계통으로 구성된다. SMART는 일체형원자로로 모든 주요부품이 원자로 용기 안에 내장되어 있으며 열출력은 330MWt로 274℃, 3.0 MPa의 과열증기를 생산하며 발전-담수생산에 적합하도록 개발되고 있다. 발전계통은 기존 원전의 발전계통과 동일하며 담수계통은 2차 계통으로부터 담수생산에 필요한 증기를 공급받는다. SMART의 주요 설계특성은 참고문헌[3,4]에 상세히 기술되어 있다.

현재 다양한 방식의 담수화 공정이 개발되어 있으며 이들 가운데 SMART의 담수플랜트로 이용 가능한 담수공정은 플래쉬 증발법(MSF:Multi-Stage Flash Distillation), 다중 효용 증발법(MED:Multi-Effect Distillation)의 증발법과 역삼투압법(RO:Reverse Osmosis) 및 이들 두 방법을 병행 적용하는 혼합(Hybrid)법 등이 있다.[7,8]

표 1은 담수계통에 사용되는 증기의 다양한 이용방법에 따른 전기 및 담수생산량에 대한 열역학적 계산결과를 보여 주고 있다. SMART를 이용한 원자력 해수담수 플랜트는 SMART에서 생산된 증기를 가장 효율적으로 이용하는 것을 목표로 하기 때문에 이들 공정 가운데 증발법을 이용한 담수공정인 MSF와 MED를 대상으로 하였으며, 담수화 공정에 사용되는 증기는 prime steam, 터빈 중간에서의 추기 및 배압 터빈의 배출 증기를 대상으로 하였다. 계산결과 이들 다양한 연계방법 가운데 담수화 공정은 MED, 담수공정에 사용되는 증기는 터빈 중간에서 추출하는 방법이 SMART의 담수생산요건인 40000m³/day을 만족하면서 다른 방법에 비해 가장 많은 양의 전기를 생산 할 수 있어 에너지 이용 효율측면에서 가장 경제적인 것으로 나타났다.[6]

2.2 SMART 담수화 플랜트

MED 담수공정

그림 1은 SMART에 사용되는 MED 공정의 흐름도를 보여주고 있다. MED는 effect로 불리는 일련의 용기 안에서 담수화 과정이 일어나며 튜브 내에서 응축하는 수증기와 튜브 외부를 흐르는 농염수 간의 잠열 교환에 의한 증발현상과 용기내의 압력을 단계적으로 낮추는 원리를 이용한다. 이러한 원리를 이용하면 첫 번째 Effect에 공급된 해수에 이후 추가적인 열 공급 없이 다중 끓음 현상을 유도할 수 있다.

SMART 담수플랜트는 MED 공정의 효율을 높이기 위하여 Steam ejector를 이용한 열압축방법을 적용하고 있다. 즉 담수공정의 열원인 증기는 열압축기(Thermocompressor)를 통해 MED 담수설비의 가장 높은 온도 영역인 첫 번째 이펙트에 공급하는 방식이다. 첫 번째 이펙트에 유입된 증기는 튜브 다발 안에서 응축하고 이 때 발생하는 잠열은 튜브를 통해 튜브 외벽의 농염수에 전달되어 응축하는 스팀과 거의 동일한 양의 수증기를 발생시킨다. 첫 번째 이펙트에서 발생된 수증기는 두 번째 이펙트에서 응축되어 담수로 되고 다시 농염수의 일부를 증발시키며 이후 이러한 과정이 마지막 effect 까지 반복된다.[1]

담수플랜트의 성능비

담수플랜트의 성능비(Performance Ratio : PR)는 담수생산단가를 결정하는 가장 중요한 인자로서 2,326kJ의 열에너지를 사용하여 생산할 수 있는 kg의 담수(Distillate)로 정의된다.[2] 높은 성능비를 가지는 플랜트는 담수생산에 사용되는 에너지의 양이 감소되어 에너지 비용은 줄어드나 플랜트의 설비에 소요되는 비용, 즉 열전달 면적을 증가시키기에 의한 비용 및 기타 추가 설비의 비용이 증가하게 된다. 반대로 플랜트의 성능비를 작게하여 시설투자비를 줄이면 에너지 소비량이 증가하여 상대적으로 담수생산단가가 상승하게 된다.

담수생산 단가는 건설비와 운전비용으로 구성된다. 그림 2는 20년 운전을 가정하여 성능비에 따른 MED 플랜트의 담수생산단가를 보여 주고 있다. 담수생산단가는 PR 8을 기준으로 상대가격으로 표시하였다. 건설비는 MED 담수 Unit의 건설비만을 고려하였으며 운전비용은 증기소모 비용, 스케일 억제 화합물 처리비용, 전력 소모비용 및 운전 및 유지 관련 노무비 등의 항목들을 고려하여 산정 하였다. 할인율은 8%를 적용하였으며, 물가상승 및 임금상승에 대한 고려는 하지 않고 운전비용을 MED담수 설비 운전개시일 기준으로 현가화 하였다.

그림 2에 나타나 있듯이 플랜트의 성능비를 높이면 건설비가 증가하며 운전비용은 줄어드는 경향을 알 수 있다. 20년 운전시 성능비 PR=8~9에서 담수생산단가가 최소로 되는 것은

로 나타났으며 운전기간을 1년~20년 변화시키는 경우에도 이와 유사한 경향까지는 것으로 나타났다.[2] 즉 PR이 낮을 경우 운전비가 많이 들고 PR=10 이상으로 높아질 경우 초기 투자비가 많이 들어 PR=8 ~ 9 정도에서 가장 경제적인 것으로 나타났다.

2.3 Steam Transformer

SMART를 이용한 원자력 해수담수화의 고려하여야 하는 중요한 요소는 방사성 물질에 의한 생산 담수의 오염을 방지 할 수 있도록 설계하는 것이다. Steam transformer는 원자로에서 생성된 방사성 물질로부터 담수플랜트를 보호하기 위한 설비로써 수평튜브 다발로 구성된다. 그림 1에서와 같이 터빈에서 추출된 증기는 튜브의 안쪽에서 응축되고 튜브의 바깥쪽은 재 순환 펌프에 의하여 물이 분사된다. 살수된 물의 일부는 증발하여 증발기 열 압축기의 motive steam으로 사용된다. 첫 번째 effect에서 생성된 응축수의 일부는 steam transformer의 보충수로 사용된다. 보충수는 steam transformer에 살수되기 이전에 예열기를 통과하면서 가열된다.[1]

2.4 SMART 발전-담수 열병합 플랜트 개념

그림 3은 SMART의 담수플랜트의 구성도로 단위 용량 10,000 m³/day인 4기의 MED unit으로 구성된다. 담수플랜트는 성능비 PR=8, 해수온도는 33℃, 첫번째 effect의 증기의 압력(온도)은 0.25 bara (69.3℃)로 설계되고 있다. SMART 담수 플랜트의 주요 설계변수는 표 2와 같다.

담수플랜트를 원자로에서 생성된 방사성물질의 이송에 의한 오염을 방지하기 위해서 담수플랜트의 각 unit은 steam transformer를 통하여 SMART의 이차계통과 연결된다. 다중제어밸브에 의한 자동 추기방식으로 9bara의 포화증기를 터빈 중간에서 추출하여 steam transformer에 공급하고 steam transformer는 이 증기를 이용하여 담수플랜트에 사용되는 증기를 생성한다. 생성된 증기는 8bar, 170.6C의 조건에서 thermo-compressor (steam ejector)를 통하여 담수플랜트에 공급된다. 그림4는 SMART 열병합 발전-담수 플랜트의 열평형도를 보여 주고 있다. 터빈의 효율을 80%를 가정하여 계산한 결과 40,000m³/day의 담수생산에 SMART에서 생성되는 전체 에너지의 약 10% 정도가 소요되며 약 87 MWe의 전기생산이 가능한 것으로 계산되었다.

3. 담수플랜트의 과도현상에 대한 SMART 안전성 평가

원자로와 담수계통은 steam transformer는 중간 열 교환기를 통하여 열적으로 연결되어 있기 때문에 담수계통에서 발생하는 과도 현상이 원자로의 안전성에 영향을 줄 수 있다. 진행속도가 느린 과도현상은 SMART의 부하추종 능력 또는 담수계통에 공급되는 증기의 양을 조절할 수 있으므로 급격히 진행되는 담수계통의 과도현상 만을 고려하였다. 현재의 설계에서 SMART 설계기준사고를 발생하는 원인이 될 수 있는 잠재적인 가상 사건은 1) 담수계통 disturbance에 의한 터빈 정지, 2) 담수계통으로의 유입되는 증기량의 급격한 증가로 인한 과부하, 3) 담수계통 정지로 인한 부하 상실 등이 있다.

담수플랜트의 disturbance에 의하여 터빈이 정지되는 사고의 경우에는 일차계통의 고압 신호 또는 이차계통의 증기의 고압 신호에 의해 원자로가 정지하게 된다. SMART의 경우 원자로 정지와 동시에 피동잔열제거 계통이 작동하여 노심의 붕괴열을 제거한다. 터빈이 정지하면 일차계통의 압력과 온도가 상승하게 되므로 일차계통의 최대 압력과 최소 DNBR이 중요한 안전변수가 된다. 그림 5는 터빈 정지사고에 대한 일차계통의 압력과 DNBR 변화로써 SMART의 SAFDL(설계압력의 110%-18.7MPa, DNBR=1.3)에 충분한 여유를 가지고 있다.

담수계통의 과부하 또는 증기 공급 배관의 파단사고는 담수계통으로 유입되는 증기량을 급속하게 증가시켜 일차계통을 냉각시키는 원인이 된다. 일차계통의 온도가 감소하면 노심 냉각재의 부 반응도가 증가하게 되어 원자로의 출력이 증가한다. 이 사고는 원자로의 고출력 또는 이차계통 증기의 저압 신호에 의하여 원자로가 정지하게 된다. 따라서 최소 DNBR이 가장 중요한 안전변수가 되며 이 사고는 SMART의 주증기간 파단사고(MSLB)에 의해 bounding 된다. 그림 6은 MSLB에 minimum DNBR로 SMART SAFDL 1.30에 충분한 여유를 가지고 있다.

담수계통의 갑작스런 정지는 담수계통으로의 증기 유입이 차단되어 이차계통의 압력이 증가하게 된다. 이 경우 이차계통의 고압신호에 의하여 원자로가 정지하게 되며 이차계통을 통한 열전달 성능 저하로 일차계통의 압력과 온도가 증가하게 된다. 이 사고는 이차계통의 전 부하상실 사고, 터빈 정지사고 및 급수파단사고에 의하여 Bounding 된다. 그림 8은 급수관 파단사고시의 일차계통의 압력의 변화에 대한 계산 결과이다.[5]

이들 결과를 종합하면 담수계통의 과도현상에 의해 야기되는 SMART 발전-담수 플랜트의 과도현상은 주요 안전변수가 SMART의 설계기준사고에 Bounding 된다. 따라서 담수계통의 연계로 SMART의 안전성을 위협하는 새로운 요인이 추가되지 않는 것으로 나타났다.

5. 결 론

원자력 해수담수화는 해수를 담수화하기 위해 사용되는 에너지를 기존의 화석연료에서 원자력으로 대체하는 것이다.

SMART 열병합 발전-담수 플랜트는 열 에너지를 가장 효율적으로 사용하는 것은 목적으로 하기 때문에 증발법에 의한 담수공정인 MSF와 MED를 대상으로 플랜트의 경제성에 가장 중요한 영향을 미치는 연계방식에 대하여 열 역학적인 민감도 분석을 수행하여 담수 공정은 MED로 담수생산에 사용되는 증기는 터빈 중간에서 추기하는 연계방법을 결정하였다. 방사성 물질에 의한 담수플랜트의 오염 방지를 목적으로 SMART 이차계통과 담수플랜트사이에 steam transformer를 설치하였으며 성능비에 따른 담수플랜트의 건설비와 운전비용을 산정하여 최적화 하였다. SMART 담수 설비는 단위 용량 10000m³/day, 성능비 PR=8로 현재 설계가 진행 중에 있다.

또한 담수 및 연계계통에서 발생 가능성 있는 사고 및 과도현상을 도출하고 이들 사고가 SMART의 안전성에 미치는 영향을 SMART 설계기준사고 해석결과를 이용한 주요 안전변수들의 bounding approach에 의하여 평가하였다. 평가 결과 이들 사고에 의해 발생 가능한 SMART의 과도현상은 모두 SMART의 설계기준사고에 Bounding 되고 있어 담수계통의 연계로 새롭게 추가되는 안전현안은 없는 나타났다.

참고문헌

1. Process description for MED-TVC Desalting Plant, SMART-HJ-PL400, KHIC, March 20, 2000
2. Optimization of the Performance Ratio for MED-TVC Desalting Plant, SMART-HJ-PL400, KHIC, March 20, 2000
3. M.H. Chang, et al., SMART AN Advanced Small Integral PWR for Nuclear Desalination and Power Generation, Proc. of Global 99, International Conference on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, USA, Aug. 29 - Sept. 3, 1999
4. M. H. Chang, et al., Development of Advanced Reactor Technology, *Research Report, KAERI/RR-1896/98*, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon (1999).
5. S. K. Sim, et al., Development of Safety Analysis Technology for Integral Reactor, *Research Report, KAERI/RR-1899/98*, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon (1999).
6. Working Material, Optimization of the Coupling of Nuclear Reactors and Desalination Systems, IAEA-RC-719, IAEA, Vienna, 16-20 Nov. 1998
7. IAEA, Technical and Economic Evaluation of Potable Water Production through Desalination of Seawater by Using Nuclear Energy and Other means, *IAEA-TECDOC-666*, International Atomic Energy Agency, Vienna (1992).
8. Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination IAEA-TECDOC-574, Vienna, 1990
9. S. A., Reed, A Source Book for Planning Nuclear Dual Purpose Electric/Distillation Desalination Plants, ORNL-TM-7190,

표 1. SMART 담수플랜트의 연계방법에 따른 전기 및 담수생산량 평가

	Power only	MSF			MED		
		Prime steam	Turbine extraction	Back-press. turbine	Prime steam	Turbine extraction	Back-press turbine
Thermal Power (MWt)	330.0	330.0	330.0	330.0	330.0	330.0	330.0
Total Electric Power (MWe)	100.0	80.0	87.0	59.0	85.0	93.0	87.0
Water Production (m ³ /day)	0.0	40,000	40,000	140,000	40,000	40,000	77,000
Net Electric Power (MWe)	100.0	75.0	82.0	44.0	83.0	90.0	83.0

표 2. Main Design Parameters of the SMARTdesalination plant

Parameters	Data
Type of the desalination process	MED combined with thermal vapor compression
Number of units per plant	4
Arrangement of plant	Horizontal
Number of effects	5
Total water production capacity	40,000m ³ /d (10,000m ³ /d x4 units)
Minimum controllable unit output	5,000 m ³ /day
Performance ratio	8.0 (kg of distillate/2326kJ)
Design temperature of seawater	33℃
Maximum seawater salinity	45,000 ppm
First effect Max. Brine Temperature	65℃
Last effect Mini. Brine Temperature	47.9
Vapor temperature in the first effect	69.3℃
Vapor pressure in the first effect	0.25 bar a
Vapor temperature in the last effect	47.9℃
Maximum distillate temperature	43℃
Total seawater flow per unit	3,234 m ³ /hr
Brine blow down flow rate	1,010 m ³ /hr
Brine blow down temperature	41℃
Steam pressure to thermo-compressor	8.0 bar a
Distillate PH at evaporator outlet	6~8
Maximum TDS of distillate at evaporator outlet	25mg/l

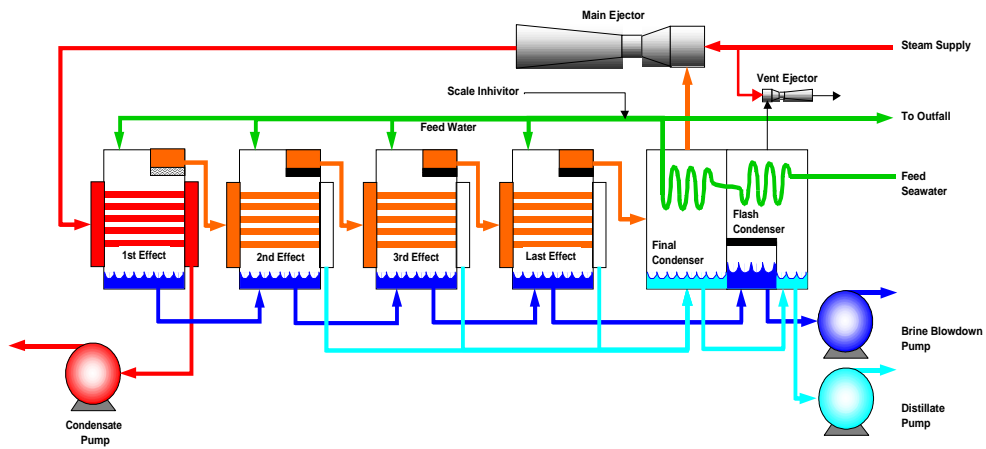


그림 1. MED-TVC Flow Diagram

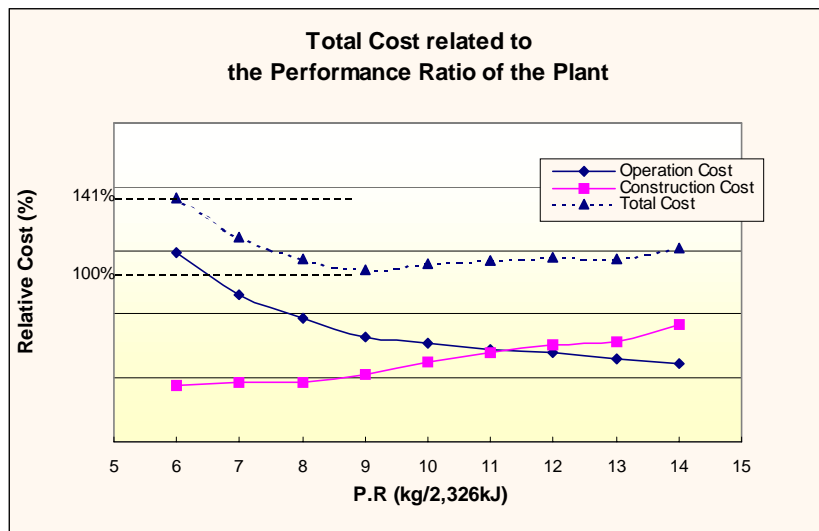


그림 2. 성능비에 따른 담수생산비의 변화

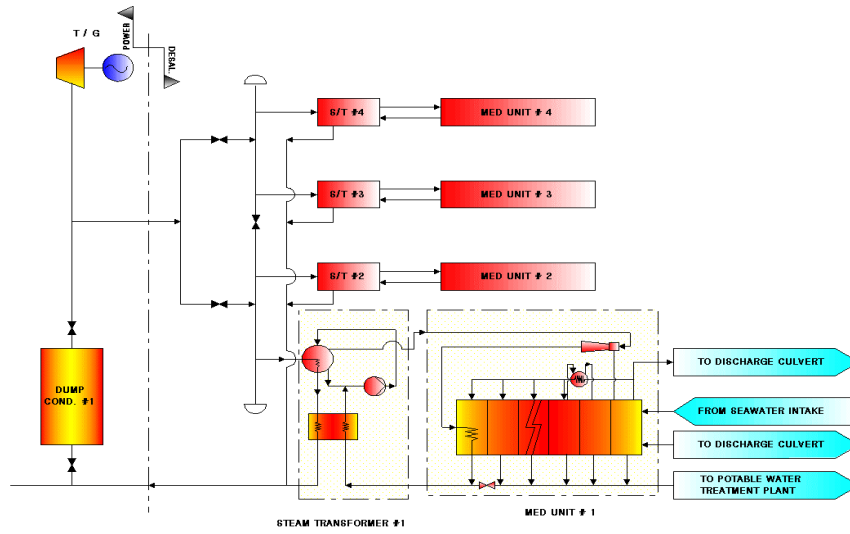


그림 3. SMART 열병합 담수플랜트의 연계 개념도

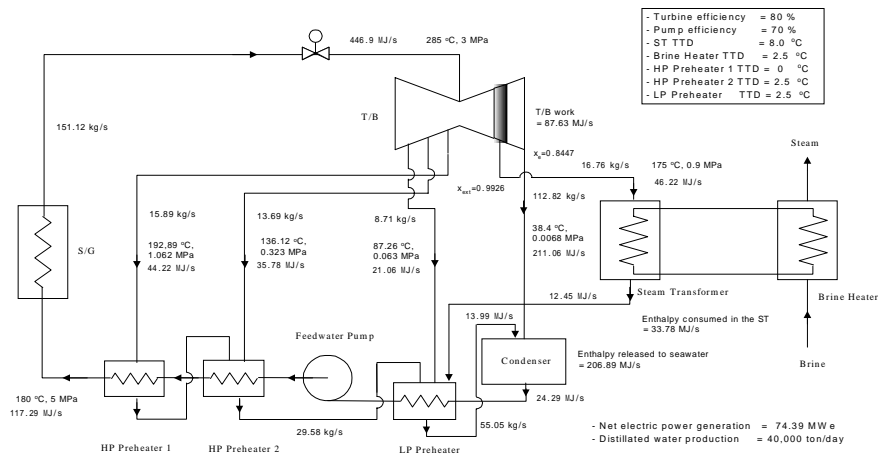


그림 4. SMART 발전-담수 플랜트의 열 평형도

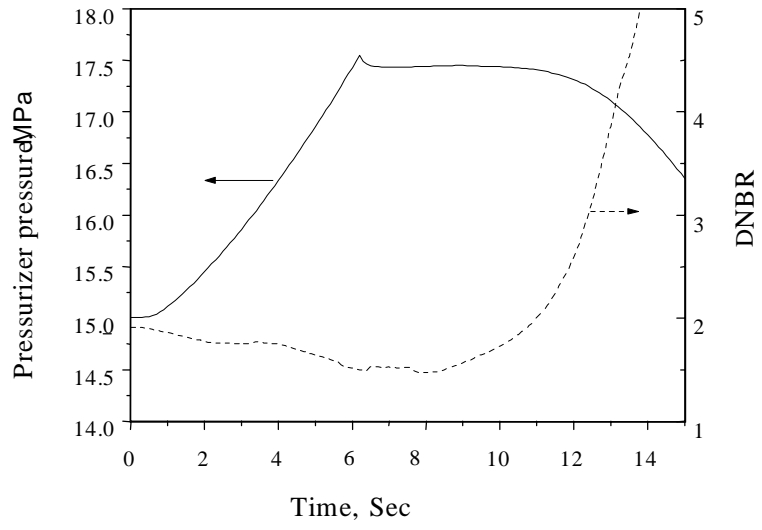


그림 4. Pressurizer Pressure and DNBR during Turbine Trip

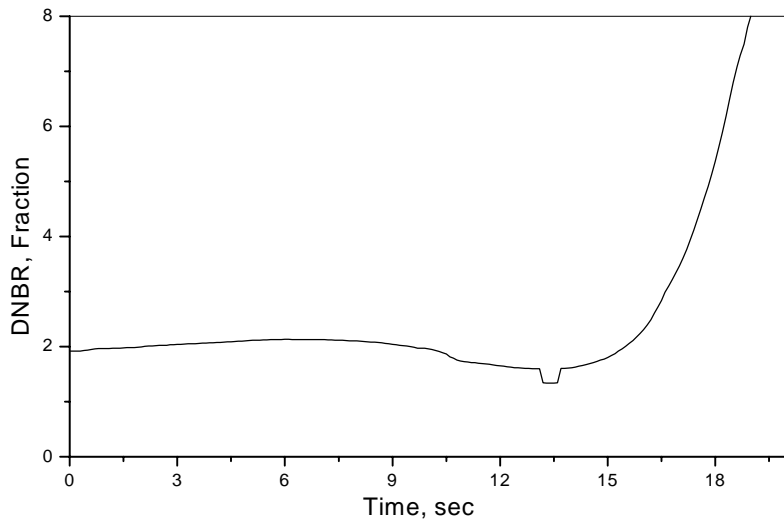


그림 5. Transient DNBR during Main Steam Line Break

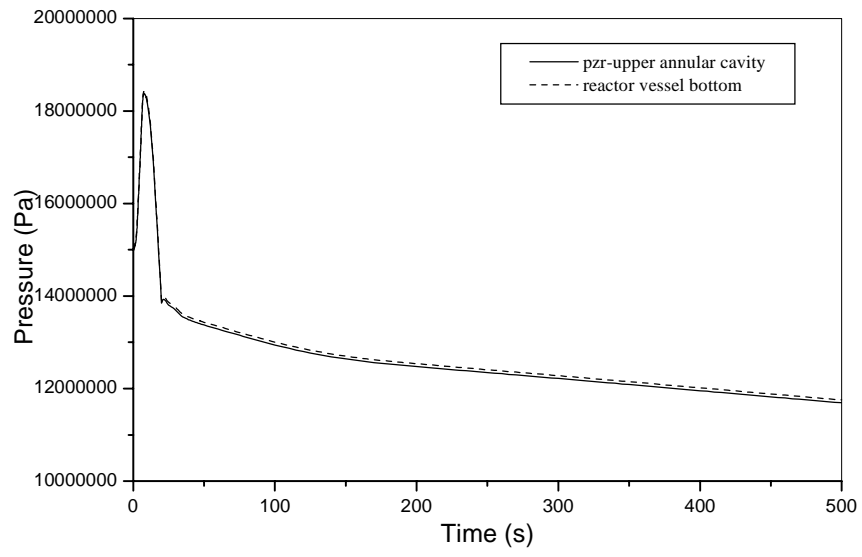


그림 6. RCS pressure during Feed Line Break