

무봉산 운전을 위한 600MWe 원자로의 초기노심 개념설계 연구

A Study on a Conceptual Core Design of 600MWe Reactor for SBF Operation

김중경, 진규동, 김순영, 한치영, 박세인
한양대학교

김궁구
한국원자력연구소

요 약

노심 반응도 제어에 붕산수를 사용하지 않고 가연성독봉 및 제어봉을 확대 사용하는 전략으로 600MWe급 무봉산 초기노심 개념설계를 수행하였다. 가연성독봉으로 농축 PYREX 독봉을 도입하여 주기초 반응도 제어 및 전 주기 동안 평평한 잉여반응도 유지에 매우 효과적인 결과를 도출하였다. 무봉산 노심의 축방향 출력분포 하단부 치중 현상을 제어하기 위하여 매우 간단한 형태로 핵연료집합체에 대한 가연성독봉의 축방향 zoning 설계를 수행하였다. 효과적인 제어봉 운용을 통하여 무봉산 노심의 잉여반응도 및 출력분포 제어가 가능하였으며 제어봉이 운전 중에 상당부분 삽입될 지라도 약 3 % $\delta\rho$ 의 충분한 운전 정지여유도를 확보할 수 있었다. 제논 안전성 분석을 통하여, 설계된 노심이 제논진동에 대해 고유 안전성을 확보하고 있음을 확인하였고, 무봉산 노심의 제한사고로서 냉각수 온도가 감소하고 정반응도가 크게 삽입되는 주증기관 파단사고를 선정하여 모사 및 분석한 결과, 본 연구에서 설계한 무봉산 원자로심은 충분한 안전성을 확보할 수 있었다.

ABSTRACT

A conceptual core design without using soluble boron in the primary coolant for reactivity control is performed to determine whether it is technically practical to implement soluble boron free(SBF) operation for 600 MWe by using an extensive use of burnable poisons and control rods. Enriched PYREX, which is effective in reactivity control at BOC and suppressing of excess reactivity throughout entire burnup cycle, is used as a burnable poison(BP) rod. To control an axial power distribution which inherently biases toward the bottom in SBF core, a simple combination of axial zoning of the BP rods is applied to fuel assemblies. An effective use of control rods makes the control of excess reactivity and power distribution possible, and sufficient shutdown margin of about 3 % $\delta\rho$ is achieved though some control rods are inserted considerably under operation. Through the xenon stability analysis, the SBF core is inherently stable against xenon oscillation during entire burnup cycle. Main steam line break accident is selected as a limiting accident in SBF operation, and from the safety analysis the core is sufficiently secured from the accident.

1. 서 론

원자력 에너지는 대규모 전력생산을 위한 동력원 뿐만 아니라 지역난방용 원자로, 해수담수화와 전력생산을 동시에 병행하는 열병합용 원자로, 선박추진 동력원으로서의 원자로 등 그

활용범위가 매우 광범위하다. 이들 분야에 요구되는 에너지 양은 대부분 중소형급 규모로서 그 활용 범위가 매우 광범위하기 때문에 현재 세계적으로 중소형급 원자로의 개발이 활발하게 추진되고 있으며, 국내에서도 원자력 에너지의 활용 증대를 도모하기 위하여 다목적 중소형 원자로 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 그러나 고도의 안전성이 확보된 중소형 원자로를 개발하는데 있어 기존 가압형 경수로의 노심 반응도 제어에 주기능을 담당하고 있는 봉산수는 많은 단점들을 가지고 있다^(1,2,3). 따라서 보다 안전한 중소형 원자로 개발에 있어 장애가 되고 있는 봉산수를 사용하지 않는 노심 관리 기법들이 적극 요구되고 있다^(3,4). 또한 최근 연구수행 완료된 국내의 무봉산 노심 설계 및 운전에 대한 타당성 분석결과⁽³⁾, 무봉산 운전개념은 대용량 발전용 원자로와 달리 고유안전개념의 신 안전기술 도입이 용이한 중소형 원자로에 적용 가능성이 높다고 할 수 있으므로 지속적인 연구수행이 절실히 요구되고 있다. 이에, 본 연구에서는 현재 Westinghouse사에서 개발 완료된 600MWe급의 AP600원자로를 대상으로 무봉산 노심 개념설계를 수행하였다. 무봉산 노심은 고온전출력 상태에서의 연료 연소로 인한 장기적 반응도 제어에 가연성독봉을 주로 사용하고, 제어봉의 과다 사용은 축방향 출력분포를 심하게 변형시키므로, 노심 전 주기 동안 연료 연소로 인한 반응도 보상에 가급적 제어봉 사용을 억제하는 전략이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 무봉산 노심에 적합한 가연성독봉의 핵특성 분석을 우선 수행하였다. 가연성독물질의 재질 및 형태별 민감도 분석을 통하여 노심 성능우위평가를 수행하고 최적화된 가연성독봉 설계안을 도출하였으며, 이를 바탕으로 매우 간단한 형태의 가연성독봉 축방향 zoning을 통해 효과적인 AO(Axial Offset) 제어가 가능하도록 하였다. 또한 제어봉에 의한 노심 잉여반응도 및 출력분포 제어 연구도 이루어져 임계 제어봉 위치 탐색 작업을 포함한 AO 및 첨두봉출력치(F_Q) 계산, 그리고 운전 정지여유도(Shutdown Margin) 확보여부에 대한 분석을 수행하였다. 설계된 무봉산 노심의 운전방식 및 노심설계변수 변화로 인해 발생할 가능성이 있는 가장 제한적인 사고를 선정하였으며 이에 대한 무봉산 노심의 안전성 평가도 함께 수행하였다.

2. 무봉산 노심 개념설계

2.1. 독물질별 무봉산 노심 성능우위 평가

무봉산 노심에서는 목표로 하는 전 주기 동안 상당히 낮은 잉여반응도를 유지해야 하므로 다양한 가연성독봉에 대하여 무봉산 핵특성을 분석하였다. AP600에 사용되는 가연성독봉인 WABA를 비롯하여 일체형 독봉으로는 IFBA, Gadolinia, Erbia, 분리형으로는 PYREX, Solid Rod, 그리고 혼합형으로는 Gadolinia+WABA와 IFBA+WABA에 대해 가연성독봉의 개수와 농축도에 따른 잉여반응도 변화, 첨두봉출력치, 잔존독작용 효과, 그리고 주기초 잉여반응도 제어효과 등에 중점을 두어 다양한 성능우위평가를 수행하였다. WABA, IFBA, 그리고 PYREX는 AP600의 설계사양에 따라 Westinghouse 17×17 표준배치로 장전하였으며 Gadolinia와 Erbia를 비롯한 Solid Rod의 장전위치는 대칭이 되도록 임의로 선정하였다. WABA와 PYREX는 안내관에 장전되기 때문에 모든 핵연료집합체에 사용하게 되면 제어봉의 사용이 불가능해지는 단점을 극복하기 위해 각 독봉이 핵연료봉 위치에 장전된 경우에 대해서도 핵특성 분석을 수행하였다. 그 결과 PYREX 독봉의 독물질을 농축한 농축 PYREX 독봉은, 평평한 잉여반응도 유지 뿐 아니라 주기초 잉여반응도 제어에 효과적이었으며 첨두봉출력치 또한 낮은 값을 나타냄으로써, 무봉산 노심 설계에 적합함을 확인하였다.

2.2. 최적화된 가연성독봉 설계 및 Axial Offset 제어

독물질별 무봉산 노심 성능우위 평가를 통하여 도출된 농축 PYREX 독봉을 사용하여 3.0, 3.5, 4.0 w/o의 농축도를 가진 핵연료집합체를 대상 원자로에 적용하였으며 18개월 이상의 주기길이를 목표로 무봉산 노심의

개념설계를 수행하였다. 전 주기 동안의 평평한 잉여반응도 유지를 위하여 각각의 핵연료집합체는 그림 1에서 보는 바와 같이 가연성독봉을 반경방향으로 zoning한 형태로 구성하였다. 또한 무봉산 노심에서 발생하는 축방향 출력분포의 노심 하단부 편중 현상을 제어하기 위하여 그림 1에서와 같이 3.5, 4.0 w/o 핵연료집합체에 대해서 공학적으로 실현 가능한 간단한 형태로 축방향 zoning 설계를 수행하였다. 3.5w/o의 핵연료집합체에 대해서는 독봉 개수는 일정하게 한 상태에서 농축도가 낮은 독봉을 상부에, 농축도가 높은 독봉을 하부에 각각 50%씩 장전하여 반응도 차이를 두었고, 4.0 w/o의 핵연료집합체는 노심 AO를 가급적 평탄하게 유지하기 위하여 PYREX 독봉의 농축도 및 개수를 함께 조정하여 장전함으로써 가연성독봉에 의한 간단한 AO 제어방안을 제시하였다. 노심의 장전모형은 여러 차례의 노심 반복계산을 통하여 반경방향 출력침투치가 최소가 되도록 그림 2에서와 같이 설계하였으며, 설계된 노심에 대한 ARO 상태에서의 연소계산을 통하여 제어봉이 담당해야 할 반응도가는 전 주기 동안 1.4 % δp 이내로 유지됨을 확인하였다.

2.3. 제어봉에 의한 잉여반응도 및 출력분포 제어

무봉산 노심은 반응도 제어에 봉산수 대신 가연성독봉과 제어봉을 확대 사용하므로, 강한 음의 감속제 온도계수의 영향으로 삽입되는 많은 양의 반응도를 제어하기 위하여 제어봉가는 기존 가압형 경수로에서 보다 훨씬 큰 값을 가져야 한다. 제어봉 배열은 Checkerboard 형태로는 충분한 정지여유도를 확보하는데 어려움이 있어, 그림 3에서와 같이 노심 중앙은 Fully Rodded 형태를, 노심 외곽은 Checkerboard 형태를 가진 Semi-Fully Rodded 형태로 장전함으로써 충분한 정지여유도를 확보하고자 하였다. 제어봉의 재질로는 잉여반응도 및 출력분포 제어용으로 Ag-In-Cd를 사용하였으며 원자로 정지용으로는 B_4C 를 사용하였다. BOC, 90% EOC, 그리고 잉여반응도가 가장 높은 상태(MAX)에서 각각의 제어봉 bank에 대한 제어봉가를 계산하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 여기서 SDB1, SDB2, SDB3 및 SDB4 bank는 노심 정지용으로서 운전중에는 삽입되지 않는다. 구성된 제어봉 bank의 연소도에 따른 임계 제어봉 위치 탐색 작업이 수행되었으며 그 결과는 그림 5에서 보는 바와 같다. RCB2 bank는 EOC를 제외한 거의 전 주기 동안 노심에 완전히 삽입되어 잉여반응도 제어를 담당하고 있으며 RCB1 bank와 RCB3 bank는 각각 노심의 하부 출력분포와 상부 출력분포 제어를 담당하고 있다. 특히, AO제어를 위한 제어봉의 운용 측면에서 RCB1 bank는 노심에 평균적으로 약 75 %, 그리고 RCB3 bank는 약 15 % 정도 삽입되는 것이 효과적임을 알 수 있었다. ARO 상태 및 그림 6과 같이 제어봉이 삽입된 상태에서 AO 값을 계산하였으며 그 결과 제어봉 삽입시 +2 % ~ -10 % 범위를 가지며 제어되었고 ARO 상태에서 AO 값은 +5 % ~ +10 % 의 범위를 유지하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 연소도에 따른 F_Q 계산결과, 그림 7에 나타난 바와 같이 전 주기 동안 2.2 % 이내로 유지됨을 확인하였다. 무봉산 노심의 안전성 분석에 사용될 감속제 온도계수는 그림 8에 나타난 바와 같이 강한 음의 값을 보이고 있다.

2.4. 정지여유도 계산 및 제논 안전성 분석

제어봉은 고온전출력(HFP)에서 저온영출력(CZP)으로 변화시 발생하는 출력결손(Power Defect), 등온결손(Isothermal Defect), 그리고 고온전출력에서의 제논 반응도가 등을 보상하고 정지여유도 제한치를 만족시키기 위해서는 충분한 제어봉가를 확보하고 있어야 한다. 또한, 무봉산 노심에서는 제어봉이 삽입된 채로 운전되기 때문에 RIA(Rod Insertion Allowance)에 대한 영향도 적지 않을 것이므로 역시 제어봉에 의한 보상이 이루어져야 한다. 본 연구에서 개념설계된 노심의 RIA는 1.1317 % δp 로서, 봉산수를 사용하는 원자로에서 고려하는 값에 비해 크지 않게 나타났는데, 이는 가연성독봉이 노심의 잉여반응도를 상당부분 제어함으로써 제어봉에 의한 잉여반응도 보상이 적기 때문이다. Stuck Rod Worth를 계산하고, N-1상태에서의 제어봉가에 10 %의 오차를 적용한 후 출력 및 온도 감소로 인한 반응도 삽입량과 제논 반응도가 및 RIA를 상쇄시켰을 때

정지여유도는 표 1에서와 같이 2.9808 % δp 를 나타냄으로써, 본 연구에서 개념설계된 600MWe 무봉산 원자로는 충분한 정지여유도가 확보되었음을 확인하였다. 본 연구에서는 축방향 제논진동에 대한 안전특성 분석을 위하여, 제논진동을 유발한 후 시간에 따른 ASI(Axial Stability Index)의 변화를 3차원 모델링을 사용하여 계산하였다. 계산결과, 주기초에서 ASI는 -0.05427 값을 나타내었고, 제논 제어가 가장 어려운 주기말에도 -0.02832의 음의 값을 나타냄으로써 무봉산 노심에서의 제논진동은 기존 가압형 경수로에 비해 안정적으로 제어될 수 있음을 확인하였다.

3. 무봉산 노심의 안전해석

3.1. 제한적 사고 선정 및 모사

무봉산 노심은 감속재 온도계수가 기존 가압경수로 보다 음의 값을 가지므로 일반적인 사고의 경우에는 더 안전하다. 그러나 주증기관 파단사고와 같이 냉각수의 온도가 감소하는 사고시에는 정반응도가 더 크게 삽입되므로, 이를 정지 제어봉만으로 충분히 제어해 줄 수 있어야 한다. 따라서 주증기관 파단사고를 제한사고로 선정하고, RELAP5/MOD3 전산코드로 모사하여 사고시 원자로가 안전하게 정지할 수 있는지를 살펴보았다. 주증기관 파단사고의 사고 전개과정은 그림 9에 나타나 있다. RELAP5/MOD3의 입력자료를 위해 260개의 제어체적, 352개의 연결체적 및 262개의 열구조를 사용해서 그림 10와 같이 노드를 구성하였다. 주증기관 파단사고 중에서도 가장 제한적인 경우를 살펴보기 위해 주기초 고온영출력 상태에서 냉각재 펌프가 작동할 경우와 작동하지 않는 경우를 각각 case 1, case 2로 하여 민감도 분석을 수행하였다. 모든 경우에 대해 노심 설계에서 계산된 감속재 온도계수와 핵연료 온도계수를 입력하여 노심의 동특성을 반영하였고, 코드모사를 위해 계산된 정상상태 조건은 표 2에 나타나 있다.

3.2. 분석결과

무봉산 노심은 봉산수 주입에 의한 부반응도 삽입을 기대할 수 없기 때문에 운전원 조치에 의해서만 사고가 종결될 수 있다. 즉, 운전원 조치가 취해지기 전까지 RTP(Return-to-Power)가 발생하는 것을 방지할 수 있다면 원자로를 안전하게 정지시킬 수 있는 것이다. 일반적으로 사고해석에서는 사고 시작후 1,800초 이내에 RTP가 발생하지 않으면 운전원 조치에 의해 사고 종결이 가능한 것으로 판단하므로, 본 연구에서도 1,800초까지 RTP가 발생하지 않는 정지제어봉 부반응도 최소값을 case 1, 2에 대해 계산하였고, 그 결과를 그림 11, 12에 각각 나타내었다. 결과그림에서 알 수 있듯이 case 1, 2 각각 11% 및 19%의 정지제어봉 부반응도로 사고 시작후 1,800초 이내에 RTP가 발생하는 것을 방지할 수 있었으며, 이 값들은 현재의 노심설계 조건에서 사고시 충분히 공급될 수 있는 값이다. 따라서 본 노심설계는 제한사고인 주증기관 파단사고에 대해 충분한 안전성을 확보하고 있다고 판단된다.

4. 결 론

600MWe급 원자로에 대한 무봉산 노심 개념설계 및 안전성 분석에 대한 연구가 수행되었고, 이를 위하여 우선 다양한 가연성독봉들에 대한 무봉산 노심 핵특성을 분석하였다. 이 중 기존 PYREX 독봉의 독물질을 농축한 농축 PYREX 독봉은 주기초 반응도 제어 능력 및 전 주기 동안 평평한 잉여반응도 유지에 탁월하다는 결론을 도출하였다. 무봉산 노심이 필연적으로 갖게 되는 축방향 출력분포의 노심 하단부 치중 현상을 제어하기 위하여 간단한 형태의 핵연료집합체 축방향 zoning 설계를 수행하였다. 18개월 이상의 주기길이를 목표로 본 연구에서

설계한 600MWe급 무봉산 원자로는 가연성독봉 및 제어봉을 확대 사용함으로써 무봉산 노심의 잉여반응도 및 출력분포 제어가 가능하였으며 기존 가압형 경수로 노심에 비하여 제어봉이 운전중 상당부분 삽입될 지라도 충분한 운전 정지여유도를 확보할 수 있다는 가능성을 확인하였으며 제어 안정성 분석을 통하여 제어진동에 대한 고유 안전성 또한 확보할 수 있었다. 또한 제한사고인 주증기관 파단사고에 대한 모사 및 분석결과를 통하여 본 연구에서 설계한 무봉산 원자로는 안전성을 확보하고 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 '98 원자력 연구개발사업 중 한국원자력연구소에서 수행중인 신형원자로 고유노심 기술개발 과제에서 지원한 위탁과제로 수행되었음

참고 문헌

1. 김순영, 김종경, “가연성독봉에 의한 차세대원자로 무봉산 노심의 잉여반응도 제어,” '97 춘계학술발표논문집, 한국원자력학회, 1997.
2. 김순영, 김종경, 정선교, “차세대 원자로 무봉산 노심 개념설계 연구,” '98 춘계학술발표논문집, 한국원자력학회, 1998.
3. 기초전력공학공동연구소, “무봉산운전을 위한 운전방식의 개선연구,” KAERI/CM-148/94, July 1, 1994.
4. ABB-CE, “Soluble Boron Free Passive PWR Study Phase II Summary Report,” November 29, 1989.

A (3.0 w/o) : 8 PYREX(12 w/o B₂O₃) + 12 PYREX(35 w/o B₂O₃)
 B1(3.5 w/o) : 4 PYREX(12 w/o B₂O₃) + 16 PYREX(33 w/o B₂O₃)
 B2(3.5 w/o) : 4 PYREX(20 w/o B₂O₃) + 16 PYREX(37 w/o B₂O₃)
 C1(4.0 w/o) : 16 PYREX(40 w/o B₂O₃)
 C2(4.0 w/o) : 8 PYREX(25 w/o B₂O₃) + 12 PYREX(36 w/o B₂O₃)

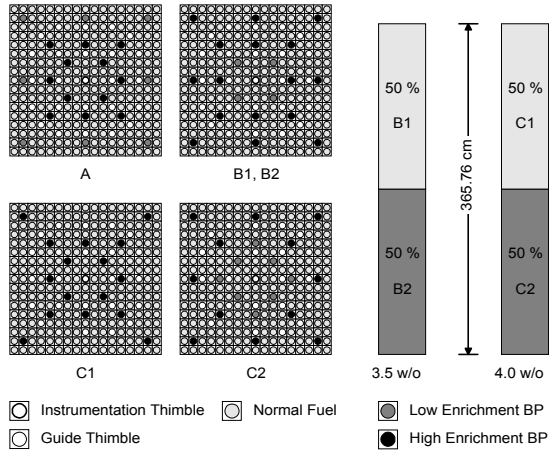
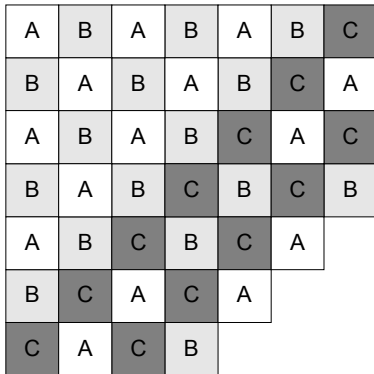


그림 1. PYREX 독봉의 장전모형 및 축방향 zoning



Region	Enrichment
A	3.0 w/o
B	3.5 w/o(B1+B2)
C	4.0 w/o(C1+C2)

그림 2. 1주기 노심 장전 모형

1	9	8	3	9		7
9	5	7	8	6	7	
8	7	4	9	8		8
3	8	9	2		9	
9	6	8		6		
	7		9			
7		8				

Index	Control Bank Name	Material
1, 2, 3	RCB 1, 2, 3	Ag-In-Cd
4, 5	LFB 1, 2	Ag-In-Cd
6, 7, 8, 9	SDB 1, 2, 3, 4	B ₄ C

그림 3. 제어봉의 재질 및 배열

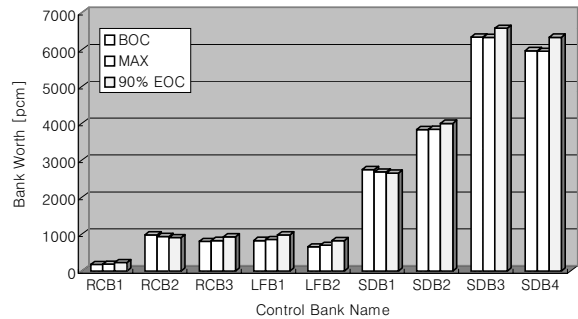


그림 4. 제어봉의 재질 및 배열

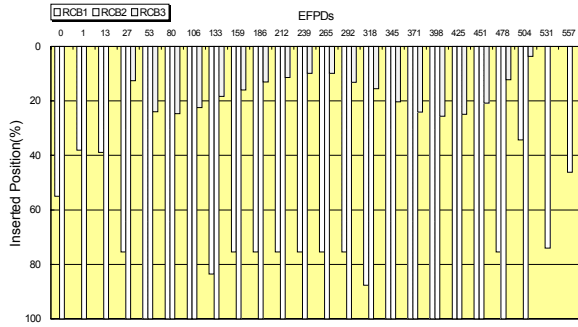


그림 5. 임계 제어봉 위치 탐색 결과

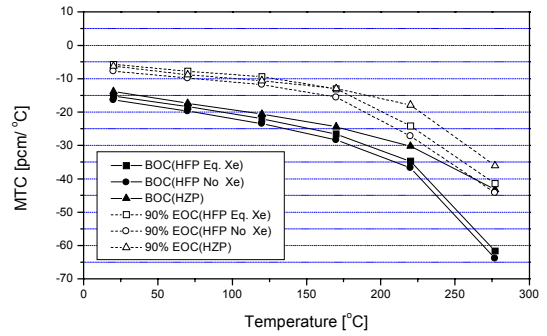


그림 8. 온도 변화에 따른 감속재온도계수 변화

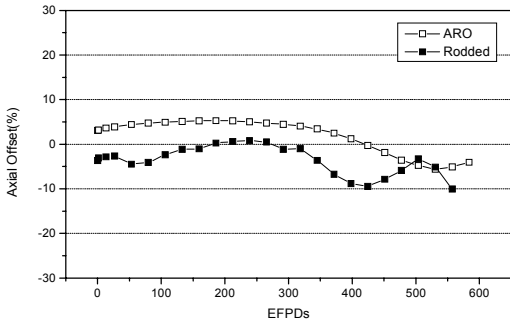


그림 6. 연소도에 따른 AO 변화

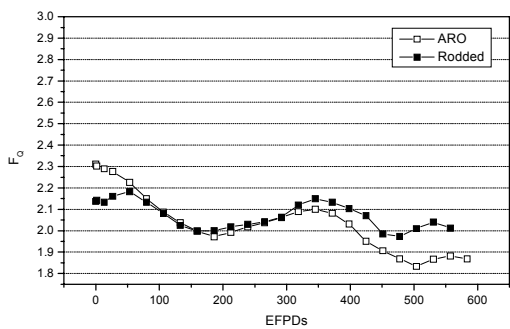


그림 7. 연소도에 따른 F_Q 변화

표 1. 정지여유도 계산결과

Requirements (% $\delta\rho$)	
A. Control Rod Requirements [(a)+(b)+(c)+(d)]	12.8244
(a) Power Defect	2.6051
(b) Xenon Burnout	2.2091
(c) Isothermal Defect	6.8785
(d) Rod Insertion Allowance	1.1317
B. Control Rod Scram(N-1) Worth [(e)-(f)]	17.5613
(e) All Full-length Assemblies Inserted	18.5240
(f) Stuck Rod Worth	0.9627
C. 10 % Uncertainty Less [B \times 0.9]	15.8052
D. Shutdown Margin [C-A]	2.9808

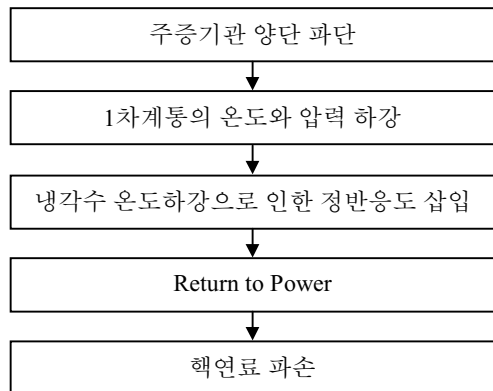


그림 9. 주증기관 파단사고 전개 과정

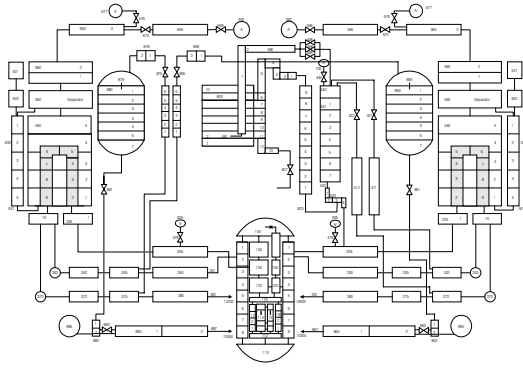


그림 10. 원자로 계통의 노드화

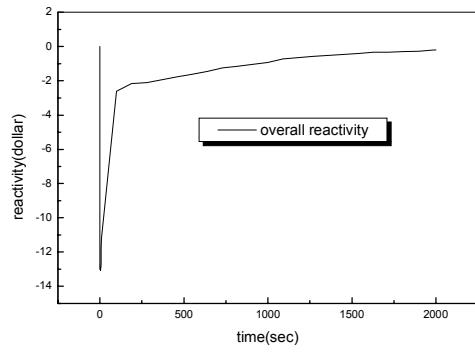


그림 12. Case 2의 반응도

표 2. 고온영출력 정상상태 모사값

Quality	Unit	Value
Core thermal power	MW	10.0
RCS pressure	psia	2290.01
Hot leg temperature	°F	547.18
Cold leg temperature	°F	547.18
Coolant flow(hot leg)	lb/sec	10839.90
Coolant flow(cold leg)	lb/sec	5434.65
Steam pressure	psia	1012.61

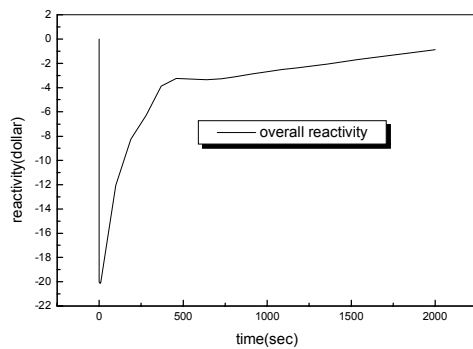


그림 11. Case 1의 반응도