

해수 담수화용 원자력발전소 설계에서의 심층방어 개념 Defence-in-Depth in the Design of the Nuclear Desalination Plants

김용식, 설광원

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

현재 국내에서 개발중인 해수 담수화용 SMART (System Integrated Modular Advanced Reactor) 원자로에 적용 가능한 심층방어 전략을 도출하기 위해, 기존 발전용원자로, 신형원자로 및 중소형원자로의 심층방어 개념 그리고 심층방어 전략을 위한 다중의 물리적 방벽과 심층방어의 단계별 이행방안을 분석하였다. 전반적으로 원자력담수화발전소 (Nuclear Desalination Plant)의 심층방어를 위한 물리적 방벽으로는 기존 방벽에 추가하여 두가지 방벽, 즉, 원자로압력용기 외부에 보호용기를 설치하여 사고이후 방사성물질의 환경 유출을 극소로 제한하고 있으며, 원자로설비와 담수화설비 사이에 열전달 회로를 설치하여 생산용수의 방사능오염 가능성을 최소화하고 있다. 이와 더불어, 심층방어의 각 단계별 이행방안으로서 사고예방능력을 향상시키기 위해 원자로 고유안전특성의 활용, 설계의 단순화 및 주기기의 일체형 배열 등을 설계에 반영하고 있으며, 사고완화능력을 향상시키기 위해 피동안전계통의 채택, 방사능유출 제한을 위한 격납시설의 강화 등 다양한 방안을 설계에 도입하고 있다. 결과적으로 이러한 체계적인 심층방어 전략의 수립 및 이행은 SMART 원자로를 포함한 원자력담수화발전소의 안전성 및 신뢰성을 상당히 증진시킬 것으로 판단된다.

Abstract

This paper examines several concepts to identify the appropriate defence-in-depth (DID) strategy for the SMART reactor which is being developed for desalination application in Korea. This paper analyzes ① the DID concepts for existing reactors, advanced reactors, and small and medium reactors, ② the multiple physical barriers design concepts for DID strategy, and ③ the implementation measures for each DID level. In general, nuclear desalination plants are designed with two additional physical barriers compared to existing nuclear plants. The first is the safeguard vessel that surrounds the reactor vessel and minimizes radiological release to the environment following accidents. The second is the intermediate circuit which is located between the nuclear plant and the desalination plant, and prevents the radioactivity contamination of the fresh water. In particular, the design concepts such as an inherent safety, simplicity of design, and modular design of major equipment are considered for improving accident prevention capability. Passive safety systems for improving the capability to mitigate accident consequences and strengthened containment for limiting radiological release are also taken into account. Therefore, the safety and reliability of nuclear desalination plants including the SMART reactor is expected to be improved by establishing and implementing a systematic DID strategy.

해수 담수화용 원자력발전소 설계에서의 심층방어 개념 Defence-in-Depth in the Design of the Nuclear Desalination Plants

김용식, 설광원

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

현재 국내에서 개발중인 해수 담수화용 SMART (System Integrated Modular Advanced Reactor) 원자로에 적용 가능한 심층방어 전략을 도출하기 위해, 기존 발전용원자로, 신형원자로 및 중소형원자로의 심층방어 개념 그리고 심층방어 전략을 위한 다중의 물리적 방벽과 심층방어의 단계별 이행방안을 분석하였다. 전반적으로 원자력담수화발전소 (Nuclear Desalination Plant)의 심층방어를 위한 물리적 방벽으로는 기존 방벽에 추가하여 두가지 방벽, 즉, 원자로압력용기 외부에 보호용기를 설치하여 사고이후 방사성물질의 환경 유출을 극소로 제한하고 있으며, 원자로설비와 담수화설비 사이에 열전달 회로를 설치하여 생산용수의 방사능오염 가능성을 최소화하고 있다. 이와 더불어, 심층방어의 각 단계별 이행방안으로서 사고예방능력을 향상시키기 위해 원자로 고유안전특성의 활용, 설계의 단순화 및 주기기의 일체형 배열 등을 설계에 반영하고 있으며, 사고완화능력을 향상시키기 위해 피동안전계통의 채택, 방사능유출 제한을 위한 격납시설의 강화 등 다양한 방안을 설계에 도입하고 있다. 결과적으로 이러한 체계적인 심층방어 전략의 수립 및 이행은 SMART 원자로를 포함한 원자력담수화발전소의 안전성 및 신뢰성을 상당히 증진시킬 것으로 판단된다.

Abstract

This paper examines several concepts to identify the appropriate defence-in-depth (DID) strategy for the SMART reactor which is being developed for desalination application in Korea. This paper analyzes ① the DID concepts for existing reactors, advanced reactors, and small and medium reactors, ② the multiple physical barriers design concepts for DID strategy, and ③ the implementation measures for each DID level. In general, nuclear desalination plants are designed with two additional physical barriers compared to existing nuclear plants. The first is the safeguard vessel that surrounds the reactor vessel and minimizes radiological release to the environment following accidents. The second is the intermediate circuit which is located between the nuclear plant and the desalination plant, and prevents the radioactivity contamination of the fresh water. In particular, the design concepts such as an inherent safety, simplicity of design, and modular design of major equipment are considered for improving accident prevention capability. Passive safety systems for improving the capability to mitigate accident consequences and strengthened containment for limiting radiological release are also taken into account. Therefore, the safety and reliability of nuclear desalination plants including the SMART reactor is expected to be improved by establishing and implementing a systematic DID strategy.

1. 서 론

최근 전기생산과 더불어 해수 담수화의 열원으로 원자력에너지를 이용하기 위해 다양한 노형 및 다양한 용량의 중소형원자로 (Small and Medium Reactors)가 각국에서 개발되고 있다. 기존 담수화 설비 (Desalination Plant)는 열원으로서 화석연료를 사용하고 있으나, 화석연료의 고갈과 CO₂의 환경문제 등으로 원자력발전소에서 생성된 열에너지를 이용하여 생활 및 공업용수 (Fresh

Water)를 생산하는 원자력담수화발전소 (Nuclear Desalination Plant)의 개발이 가속화되고 있다 [1]. 대표적인 원자력담수화발전소로서는 러시아의 40 MWt의 KLT, 150 및 300 MWt의 NIKA 원자로, 중국의 200 MWt의 NHR 원자로, 이탈리아의 50, 200 및 1,000 MWt의 NILUS 원자로 등이 있으며, 일본에서는 선박용 원자로인 100 MWt의 MRX를 해수 담수화용으로 개발하고 있다 [2]. 우리나라에서도 담수화 설비를 터빈 발전기에 연결하여 용수 및 전기를 생산하는 330 MWt 용량의 일체형 원자로인 SMART (System Integrated Modular Advanced Reactor)가 지난 1996년부터 한국원자력연구소에 의해 개발되기 시작하였다. 이 중에서 중국의 NHR 원자로로는 5MWt의 실증시험로가 건설되어 지난 6년간 운전된 경험이 있다.

원자력담수화설비의 최종 생산물은 전기, 그리고 생활 및 공업 용수가 된다. 일반적으로, 용수의 원거리 수송은 고비용 때문에 경제적이지 못하므로 원자력담수화설비는 최종 사용자와 가까운 위치에 설치되어 운전된다. 이는 비상계획구역 등의 거리 개념에 의한 기존의 방사선 방호가 더 이상 유효하지 않을 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 원자력 시설로 인한 잠재적인 방사선 재해로부터 인근주민 및 환경을 보호하고, 생산되는 용수의 방사능 오염 방지를 위해 기존 원자력발전소에 비해 상당히 향상된 안전성을 확보하는 것이 원자력담수화발전소의 일차적인 설계목표가 되고 있다. 이를 위해 원자로의 고유안전특성, 피동안전특성 및 혁신적인 설계개념을 사용한 강화된 심층방어 개념 (Defense-in-Depth)이 원자력담수화발전소 설계에 적용되고 있으며, 이에 대한 체계적인 평가와 분석이 요구되고 있다. 본 연구에서는 기존 발전용 원자로 및 신형원자로에 적용되어 왔던 심층방어 개념, 그 개념의 확장 및 발전, 그리고 심층방어 전략을 위한 다중방벽의 설계개념과 단계별 이행방안을 분석하고, 이를 바탕으로 원자력담수화발전소 설계에서 안전성 증진을 위해 요구되는 강화된 심층방어 개념과 이의 이행방안을 논의해 보고자 한다. 이는 기본설계단계에 있는 우리나라 SMART 원자로의 심층방어 전략을 체계적으로 수립하고 이행하는데 도움을 줄 것이며, 궁극적으로 증진된 안전성을 확보하는데 기여할 것이다. 또한, 향후 원자력담수화발전소의 안전성을 종합적으로 평가하는데 참조할 수 있을 것이다.

2. 심층방어 개념 [3,4,5]

2.1. 심층방어 개념의 발전

심층방어 개념은 원자력발전소의 안전성을 확보하기 위한 가장 중요한 철학으로서, 안전성이 증진된 새로운 원자로를 개발함에 있어 강화된 심층방어의 이행은 핵심적 설계사항으로 고려되어 오고 있다. 심층방어는 그 의미하는 바와 같이 다중의 연속적인 단계에 의해 한 단계의 기능상실로 인한 사건의 전개가 다음 단계로 진행되지 않도록 단계별 독립적인 기능을 수행하는 개념으로서 궁극적으로 원자력발전소의 운전으로 인한 잠재적 방사능 재해로부터 종사자 및 일반대중을 보호하는 목적을 가지고 있다. 이러한 심층방어는 발전소의 과도 및 사고 조건에 대해 단계별 조치를 취함으로써 다음의 3가지 목적을 달성하도록 설계 및 운전에서 이행되고 있다.

- 발생 가능한 인적실수 및 기기고장을 보상하고,
- 발전소 손상을 방지하기 위한 심층 방벽의 유효성을 유지하며,
- 방벽의 유효성이 손상된 이후에도 방사능으로부터 공공 및 환경을 보호하는 것이다.

이러한 심층방어의 개념은 원자력 발전소의 안전성 증진 요구와 함께 발전해 왔으며, 특히 1979년 미국 TMI 사고 이후에 중대사고에 대한 대처수단이 심층방어 개념에 도입되면서, 확대 및 강화되어 체계성을 갖추기 시작하였다. 초기 발전용 원자로에서는 일반적인 경험에 의해 계산된 발생빈도에 근거하여 단일 초기사건들을 가상하고, 주로 사고예방 차원에서 다음과 같은 3가지 단계의 심층방어 개념이 적용되었다.

- 1 단계: 예상운전과도 조건과 설비의 고장상태 간에 여유도를 제공하는 보수적인 설계
- 2 단계: 과도상태가 사고로 진전됨을 방지하기 위해 제어, 제한 및 보호 계통을 활용하는 비정상운전, 또는 계통고장 징후에 적절히 대응하는 운전제어
- 3 단계: 사고가 중대한 사고로 진전됨을 방지하거나 그 결과를 완화하기 위하여 가상사고를 제어하기 위한 공학적 안전설비

미국 TMI 사고는 기존 심층방어의 취약성을 평가하는데 중요한 기회를 제공해 주었으며, 지속적인 안전성 증진 요구와 안전개념의 개발, 각종 운전경험에 의해 심층방어 개념이 확장되고 강화되는 기회가 되었다. 즉, 다양한 사건 및 사고의 예방과 그 결과의 완화를 함께 고려하는 균형 있는 심층방어 접근방법이 개발되었는데, 이는 TMI 사고 이후 중대사고에 대한 확률론적 안전성평가 방법의 개발과 광범위한 연구결과가 축적되었기 때문에 가능한 것이었다. 따라서, 심각한 노심손상을 방지하거나 노심손상으로 인한 결과를 완화하기 위하여 주로 다음과 같은 부분에서 심층방어 개념이 확장되었다.

- 다중계통의 완전상실 등 심각한 다중고장을 대처할 수 있는 조치
- 사고예방 또는 결과의 완화를 위한 사고관리 이행
- 사고징후에 근거한 비상운전절차서의 개발
- 방사성물질의 유출로 인한 공중 및 환경에 미치는 영향의 완화를 위한 비상대응 조치

이러한 심층방어 개념의 발전에 의해 현행 원자력발전소에 적용되는 심층방어 개념은 그림 1에서 보는 바와 같이 핵분열생성물질의 감금기능을 갖는 핵연료, 핵연료 피복재, 원자로냉각재 압력경계, 격납용기로 구성된 4개의 물리적 방벽 (Four Physical Barriers)과 발전소의 운전상태를 고려한 5개의 연속적 보호단계 (Five Levels of Protection)로서 정착하게 되었다. 그리고, 기존 원자력 발전소의 안전성 증진을 위해 추가적으로 운전경험의 반영, 저출력 및 정지운전 상태의 고려, 인적요인의 고려 등이 심층방어 개념을 개선 및 보완하려는 노력의 일환으로 추진되어 왔다.

2.2. 4개의 물리적 방벽 및 5단계의 보호수단

원자력 발전소의 심층방어 개념은 사고예방 (Accident Prevention)과 사고 이후 심각한 상황으로의 진전을 방지하는 사고완화 (Accident Mitigation), 두가지 전략에 기반을 두고 있다. 즉, 심층방어를 구성하는 다중의 물리적 방벽을 이용한 5 단계 보호조치를 살펴보면 심층방어의 1~3 단계는 노심의 구조적 건전성 유지, 물리적 방벽의 보호 및 잠재적 방사선학적 위험을 제한하기 위한 사고예방 측면의 조치인 반면, 4~5 단계는 심각한 노심손상을 수반하는 사고의 가능성과 사고시 방

사성물질 유출량을 실현 가능한 한 낮게 유지하고, 심각한 유출로부터 종사자, 일반대중 및 환경을 보호하기 위한 사고결과의 완화조치로 구성되어 있음을 알 수 있다. 심층방어의 각 단계별 주요 보호조치 내용을 살펴보면 다음과 같다.

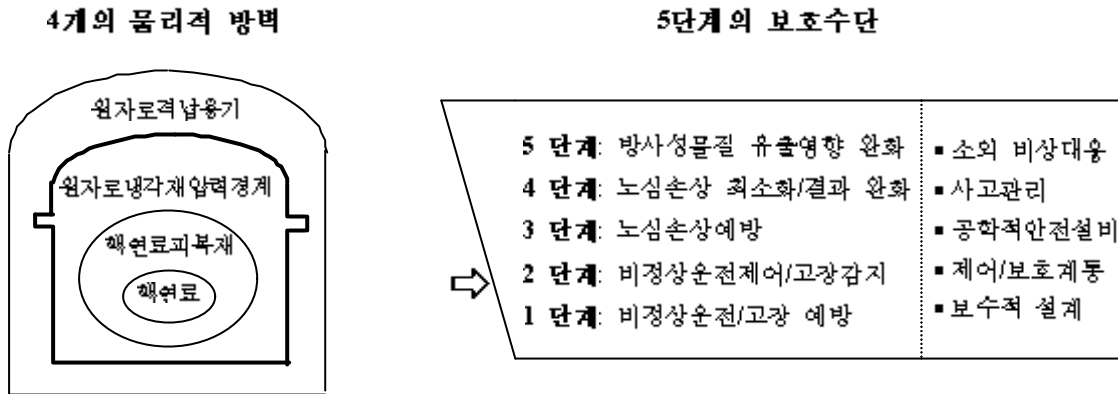


그림 1. 심층방어 개념의 4개 방벽과 5단계 보호수단

1 단계는 방사능물질의 감금과 정상운전조건으로부터 이탈을 최소화하기 위해 고려되는 보호 조치로서, 방사성물질 감금수단의 보수적 설계, 적절한 안전여유도 확보, 충분한 운전원 대응시간 확보 및 적합한 재료의 선정 등이 포함된다. 2 단계는 예상운전과도상태 발생시 이를 제어하여 정상운전 상태로 복구시키는 데 필요한 계통 및 설비들을 설계에 반영하는 조치로서, 원자로보호 설정치에 도달하기 전에 시정조치를 취할 수 있는 자동제어계통이나 원자로출력, 압력, 온도, 수위를 자동제한하는 계통들이 포함된다. 3 단계는 1~2 단계 예방조치의 제공에도 불구하고 사고상황이 발생하는 경우, 중대사고로의 진전을 방지하고 방사능물질을 격납용기 내부에 감금할 수 있도록 공학적 안전설비 및 보호계통을 제공하는 것으로서, 주로 노심손상 방지에 목표를 두는 보호단계이다. 이 방어단계에는 물리적 방벽, 특히 격납용기의 밀봉기능 유지가 중요한 목표이며, 공학적 안전계통의 신뢰성 보장을 위한 다중성 설계, 공동모드 고장 방지, 인적실수 최소화를 위한 자동화 등의 설계 원칙이 이 보호조치에 포함된다. 4 단계는 다중고장 사고 등을 포함하는 사고 상황시 환경으로 방사능물질 유출을 최소화하기 위한 보호조치로서, 방사능물질 감금기능의 보호가 가장 중요한 조치이며, 중대사고를 제어하고 그 영향을 완화하기 위한 사고관리 조치가 이 단계에 해당된다. 5 단계는 이상에서 기술한 보호조치들이 설계기준사고 뿐만아니라 중대사고의 영향을 제한하는 데 효과적일 수 있지만, 예상치 않은 심각한 상황이 발생하는 경우에 대비하여 소내 종사자 뿐만 아니라 소외 주민들에 대한 대피 또는 소개 계획을 수립하는 것이다. 이 보호조치에는 소외 비상계획 및 절차서 구비와 소내외 비상훈련 실시가 포함된다.

설계단계에서 심층방어 개념의 이행은 정상, 비정상 혹은 사고조건하에서 안전기능을 수행하기 위한 효과적인 설계수단을 제공하는 것으로서, 초기사고의 발생확률은 고려하지 않고 결정론적 가정 및 절차에 근거하여 대응 수단을 확보하게 된다. 즉, 1~3 단계 방어개념에서는 적합한 보수성 및 품질보증이 전제조건으로 고려되어야 하며, 4 단계에서는 최적계산에 근거한 결정론적 방법을 활용하여 방어수단을 구비할 수 있다. 이와 더불어, 확률론적 안전성평가는 이러한 결정론적 평가 방법을 보완하여 발전소의 설계 및 운전상 취약성을 평가하고 심층방어를 개선하는데 효과적인

수단으로서 사용될 수 있다.

3. 신형원자로에 적용된 심층방어 개념 [6,7]

기존 원자력발전소에 비해 안전성과 신뢰성의 향상을 요구하고 있는 신형원자로에서도 강화된 심층방어 개념이 다양하게 설계에 적용되고 있다. 특히, 기존 심층방어 개념과 더불어 추가적으로 중대한 노심손상 확률의 감소와 사고발생시 방사성물질 감금기능의 강화 등을 통해 신형원자로의 안전성 향상을 요구하고 있다. 이는 설계 기준사고를 초과하는 사고들이 원자력발전소의 위험도에 매우 큰 기여를 한다는 과거의 운전경험과 중대사고의 이후의 물리적 현상에 대한 광범위한 연구 결과에 근거하고 있다. 따라서, 신형원자로의 심층방어 강화방안으로서 가장 중요하게 고려되는 부분은 중대사고 이후 방사성물질의 외부유출을 제한하는 기능의 개선으로 다음과 같은 보호조치들이 포함되고 있다.

- 격납용기 조기기능상실로 인하여 대량 방사능 유출로 이어지는 가상의 중대사고 경위들이 신뢰성 있게 배제될 수 있음을 결정론적 및 확률론적 해석방법을 이용하여 입증
- 격납용기 후기기능상실로 이어지는 중대사고 경위를 대처할 수 있는 설계
- 노심용융이 발생하지 않는 사고상황하에서 발전소 인근주민들의 대피 또는 소개 등의 보호조치가 필요 없을 정도로 설계
- 노심용융이 일어나는 설계에 고려된 중대사고상황에서는 음식물 섭취제한 등 제한적인 조치만이 요구되도록 최적계산 방법으로 입증

이와 더불어, 심층방어 전 단계에 걸쳐 공통적으로 기능상실을 유발할 수 있는 인자들로서 운전원의 인적실수, 외적요인 및 저출력/정지운전중 방사성 물질의 외부 유출 및 격납용기 우회 등이 가능하므로, 이들의 발생 가능성을 최소화하거나 배제할 수 있는 방안을 모색함으로써 추가적인 안전성 향상을 기대하고 있다. 이상과 같이 신형원자로에 대해 요구되는 확장된 혹은 강화된 심층방어 각 단계별 이행방안은 다음과 같다.

1 단계에서는 운전경험에 근거하여 저출력 및 정지운전조건을 포함하는 광범위한 운전조건을 설계에 고려함으로써 초기고장빈도를 낮추는 것이다. 2 단계에서는 운전경험자료에 근거하여 인간-기계 연계를 개선하고 디지털 기술을 이용한 진단계통을 확대 도입하는 것이다. 3 단계에서는 다중고장에 의해 야기되는 사건 및 사고들을 설계에 고려하는 것이며, 4 단계에서는 다량의 수소생성 시에도 견딜 수 있는 격납건물을 확보하고 격납건물의 파손을 예방하기 위한 설계를 고려하는 것이다. 5 단계에서는 이러한 1~4 단계의 개선을 통해 사고 선원향을 저감하는 것이다. 일반적으로 심층방어 1~3 단계에서는 보수적인 가정, 보수적인 설계원칙 그리고 보수적인 허용기준이 적용되며, 결정론적 방법과 이를 보완하는 확률론적 안전성 평가방법이 사용될 수 있다. 4 단계에서는 설계기준을 초과하는 사고에 대한 취약성을 평가하고 설계에 고려할 필요가 있는 사고경위들을 도출하여 설계에 반영하는 단계로서, 최적계산에 기초한 해석과 허용기준이 사용될 수 있다. 표 1에는 이상의 신형원자로 설계에 적용되는 심층방어 단계별 목표와 기본적인 보호수단, 그리고 운전조건별 허용기준을 비교하여 제시하였다.

표 1. 원자력발전소의 심층방어 단계별 목표 및 운전조건

단계	단계별 목표	기본수단	운전조건	소외선량기준 [8]
1 단계	비정상운전 및 고장의 예방	보수적 설계, 적절한 품질보증	정상조건	10 CFR 50, App. I
2 단계	비정상운전 제어 및 고장감지	제어, 제한, 보호 계통 및 감시설비	예상운전과도	10% of 10 CFR 100
3 단계	설계기준 이내로의 사고 제어	공학적안전설비 및 사고절차	설계기준사고	25% of 10 CFR 100
4 단계	심각한 발전소 조건의 제어 - 사고진행 방지 - 사고결과 완화	사고예방/완화 및 사고관리	- 노심손상없는 중대사고 - 노심손상있는 중대사고	100% of 10 CFR 100 * CDF < 10^{-6} /ry * LERF < 10^{-6} /ry
5 단계	방사성물질 유출 영향 완화	소외 비상대책	-	-

* CDF: Core Damage Frequency, LERF: Large Early Release Frequency

4. 해수 담수화용 원자력발전소의 심층방어 개념

4.1. 심층방어 개념의 강화

기존 원자력발전소 및 신형원자로에 적용되어오던 심층방어 개념은 과거의 운전경험에 근거하여 원자력담수화발전소에도 유효하게 적용될 수 있다. 그러나, 원자력담수화발전소의 활용특성, 즉 설치 위치 및 최종 생산물의 차이에 의해 기존 발전용 원자로 및 신형원자로와 상당히 다른 추가적인 심층방어 개념이 적용되어야 할 것이다. 원자력담수화발전소에서 심층방어 개념이 확장되고, 강화되어야 할 필요성은 다음과 같다.

첫째, 최종 생산물로서 전기와 더불어 용수를 생산하는 원자력담수화발전소는 용수가 직접 혹은 간접적으로 방사능 물질에 의해 오염될 가능성이 존재한다. 따라서 최종 사용자에게 대한 직접적인 방사능 물질의 오염 가능성이 배제되고, 간접적인 오염 가능성도 극소화되도록 설계에서 고려되어야 한다.

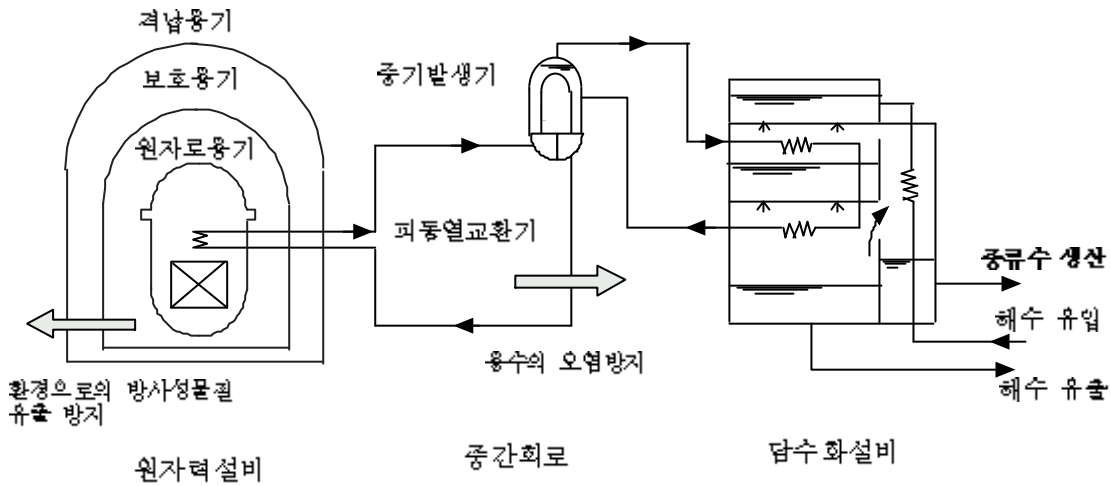
둘째, 원자력담수화발전소는 경제성 제고 측면에서 최종 생산물을 사용하는 주민들 가까운 위치에 건설, 운영될 것으로 예상된다. 따라서, 기존 발전용 원전의 거리 개념에 근거한 비상계획 대처 방안과는 달리 비상상황에서 인근 주민의 대피 및 훈련, 혹은 단전 및 단수와 같은 생활의 불안요소가 배제되도록 설계에서 고려되어야 한다.

셋째, 원자력담수화발전소는 산업기반시설 혹은 전문인력이 충분하지 못한 외딴 지역 혹은 섬 지역에 위치할 수 있으며, 지상이 아닌 선상 혹은 바지(Barge)에 설치될 수 있다. 따라서, 설치 및 건설되는 지역의 사회적, 경제적 여건과 추가적인 외부인자들이 설계에서 고려되어야 한다.

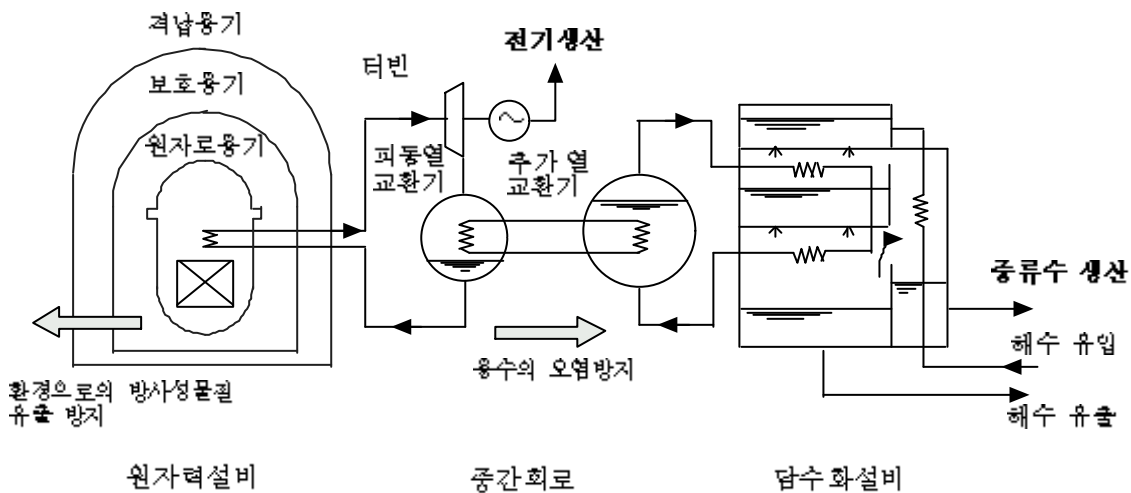
이러한 원자력담수화발전소의 활용 특이성에 따라 심층방어 개념에서 추가적으로 고려해야 할 물리적 방법, 그리고 강화된 단계별 이행방안을 체계적으로 검토하여 설계에 반영함으로써 상기 설계요건이 만족되도록 해야한다. 이를 위해 다음절에서는 현재 각국에서 개발하고 있는 원자력담수화발전소의 설계개념을 근거로 강화된 심층방어 개념 및 전략을 분석하고 체계적인 심층방어 이행방안을 논의한다.

4.2. 강화된 심층방어 개념의 이행

원자력담수화발전소에 적용되는 심층방어 개념은 근접한 위치의 인근주민 및 환경을 방사능 재해로부터 보호하고, 생산 용수를 방사능 오염으로부터 방지하기 위해 발전용 원전에 적용되는 심층방어 개념과 더불어 추가적인 방어전략이 요구된다. 이와 관련하여 현재 개발 혹은 운영되고 있는 해수 담수화용 원자력발전소는 원자로 주요계통을 일체형으로 배열하여 계통을 단순화시키고, 고유 안전특성 및 피동안전특성을 활용하여 계통의 신뢰도를 향상시키고 있으며, 계통의 자동화를 통해 인적실수를 최소화하고 있다. 특히, 그림 2에서 보는 바와 같이 심층방어의 추가적인 방법으로 기존 격납용기에 추가하여 보호용기 (Safeguard Vessel)를 설치함으로써 방사성물질의 환경 유출 가능성을 극소화하고, 원자로설비와 담수화설비 사이에 중간회로 (Intermediate Circuit)를 설치하여 담수화 설비에서 생산되는 용수의 방사능 오염 가능성을 극소화하고 있다. 이러한 추가적인 물리적 방법은 원자력담수화발전소에서 안전성 증진을 위해 채택하고 있는 가장 특이한 설비중 하나이다.



(1) 용수 생산용 원자력담수화발전소



(2) 용수 및 전기생산용 원자력담수화발전소

그림 2. 원자력담수화발전소에서 심층방어를 위한 추가방법

원자력담수화발전소 설계에서 기존의 물리적 방법과 안전성 증진을 위해 추가적으로 설치된 방법에 근거하여 심층방어의 단계별 추가 개선 사항을 분석해 보면 다음과 같다.

- 1 단계: 노심 및 냉각재 재고량에 있어서 추가의 설계여유도를 확보하고, 일체형으로 설계를 단순화함으로써 초기사건 발생빈도를 감소시키며, 사고시 운전원 대처기간을 늘리는 방안 등을 통해 정상운전으로부터 비정상상태로의 이탈을 충분한 여유도를 가지고 대처한다. 또한, 원자로압력용기 노심 위치에서 용접 부위를 배제함으로써 원자로용기의 건전성을 확보하고 있다.
- 2 단계: 원자로의 전운전 상태에서 큰 음의 반응도계수를 유지하고 다양성에 근거한 반응도 제어계통을 추가로 설치하여 ATWS 관련 사고에 대처하고 있다. 과도상태, 기기의 이상상태 등을 감지하여 문제 발생시 운전원에게 충분한 정보를 제공해 주는 감시 및 진단계통이 디지털기술의 발전에 의해 강화되고 있다.
- 3 단계: 냉각재재고량제어 및 붕괴열제거에 중력 및 자연순환 등과 같이 자연현상에 근거한 피동안전계통을 채택하여 운전원의 개입을 최소화하고 있다. 즉, 신뢰성 높은 피동안전 계통을 도입하거나 고유 안전특성에 근거한 계통들을 채택하여 안전성을 증진시키고 있다. 또, 일차계통이 고압인 상태에서 사고가 발생하는 경우 노심냉각 및 잔열제거 기능을 확보하기 위해 일차계통 압력을 급속히 낮출 수 있는 안전감압계통을 설치하고 있다. 담수화 설비로 방사능이 유출되어 용수가 방사능에 오염되는 것을 방지하기 위해 원자로설비와 담수화설비 사이에 추가적인 회로를 설치하고 있으며, 일차회로의 압력보다 높게 설계하여 일차열교환기 파단시 담수화설비로부터 원자로설비로 누설이 이루어지도록 하고 있다.

표 2. 보호용기와 격납용기의 기능 비교 (러시아 NIKA 원자로)

항 목	보호 용기	격납 용기
기 능	• LOCA를 포함한 모든 설계기준 사고의 결과 완화	• 보호용기 건전성 상실시 방사성 물질 외부 유출 억제
강도 및 누설밀봉	• 100 % 누설밀봉 유지 (소형계적)	• 제한된 강도와 조건적인 기밀성 유지 (허용누설률 0.5 %/day)
출입 및 배치기기	• 출력운전 중 출입불가 • 가동중 보수 불필요한 설비 배치	• 출력운전 중 일부 구역 출입가능 • 일차 및 이차 계통 기기를 배치
공기냉각	• 정상운전조건 확보를 위해 공조 계통 계속 가동 (내부 공기 온도 $\leq 50^{\circ}\text{C}$)	• 별도의 강제냉각장치 불필요 • 보호용기 냉각 기능 상실시 분사계통을 통해 보호용기 냉각을 수행
노심냉각	• 보호용기는 LOCA 사고시 원자로용기 내외부의 압력 평형을 가능하게 하며, 유출된 일차 냉각재를 가두어 자연순환에 의해 노심을 냉각시킬 수 있음.	• LOCA 사고시 계속적으로 일차 냉각재가 유출됨.
원 자 로 냉 각	• 설계기준 초과사고후 일차회로에서 유출된 냉각재를 이용하여 원자로를 냉각시킬	• 일차회로에서 유출된 냉각재가 넓게 퍼져 원자로 냉각을 위한 별도의 냉각수원이 필요함
제작비용	• 보호용기 제작비용은 고가이지만 격납용기가 낮은 압력에 견디도록 제작되므로 결과적으로 경제적이다.	• 높은 압력에 견디는 큰 부피의 격납용기 제작은 매우 비쌈.

- 4 단계: 확률론적 안전성평가를 통해 위험도가 높은 사고경위를 도출하고 이의 대처수단을 확보하고 있다. 방사능물질의 환경 유출에 대비한 최종 방벽인 격납용기의 밀봉기능유지를 위해

과압방지 수단과 여과배기를 채택하며, 노심용융사고시 격납용기로 방출되는 용융물을 감금하고 충분히 냉각하기 위한 구조설계를 하고 있다. 기존 격납용기와 더불어 원자로 압력용기 외부에 보조덮개 혹은 보조용기 등을 설치하여 설계기준사고 및 설계기준초과사고 발생시 방사성물질의 환경 유출을 최소화시키고 있다. 표 2에는 한 예로서 러시아의 NIKA 원자로 설계에서 채택하고 있는 격납용기와 보조용기의 기능을 비교하여 제시하였다.

• 5 단계: 상기 1~4 단계의 심층방어 강화는 사고로 인한 방사능 유출량 뿐만 아니라 발생빈도 측면에서도 상당히 극소화시킨다. 따라서, 소위 비상계획은 기존 원자력발전소에 비해 상당히 단순화되고 축소될 것이다.

이상의 해수 담수화용 원자력발전소에 추가적으로 적용되는 심층방어 전략과 기존의 심층방어 수단을 정리하여 표 3에 나타내었다. 심층방어의 3 및 4 단계에서 원자력시설과 담수화시설 사이의 추가회로 설치 및 원자로압력용기 외부에의 보조용기 설치 등이 추가되었고, 각 단계별로 강화된 이행방안이 추가되고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 기존 발전용 원자로 및 신형원자로의 심층방어에 비해 강화된 개념, 즉 물리적 방벽의 추가 및 단계별 보조수단의 개선을 통해 안전성을 증진시키는 방향으로 원자력담수화발전소가 설계되고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 원자력담수화발전소의 안전성은 노심손상빈도와 일반대중에 미치는 위험도를 기준으로 할 때 단계별 체계적인 심층방어 개념의 강화를 통해 기존 원전에 비해 수십 내지 수백배 향상될 것으로 기대할 수 있다. 이러한 심층방어 전략의 체계적인 수립 및 이행은 우리나라에서 개발하고 있는 전기 생산 및 해수 담수화용 SMART 원자로 설계에도 반영될 수 있으며, 이를 통해 SMART의 종합적인 안전성 증진을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 안전성 증진을 위해 새로이 도입되는 설비, 즉 피동 안전계통, 고유안전설비 및 혁신적인 수단은 계통 및 운전의 단순화와 높은 신뢰성을 제공해주지만, 원자력발전소에 활용하기 위해서는 계통의 성능하중 및 계통 상호간의 영향이 실험, 해석 및 연구개발을 통해 검증되어야 하는 문제를 남겨두고 있다.

표 3. 원자력담수화발전소의 심층방어 개선 및 강화

단 계	목 표	주요 개선 조치
1 단계	비정상운전 및 고장 예방	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 추가의 설계여유도 확보 (노심설계, 냉각수 재고량 향상 등) ▪ 사고 이후 운전원 대처기간 추가 확보 (72시간 등) ▪ 일체형 배열을 통한 설계 단순화 (안전 기기 수의 최소화) ▪ 원자로압력용기 노심위치의 용접배제 (방사선취화 저감)
2 단계	비정상운전 제어 및 고장감지	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 강력한 음의 반응도계수 유지 ▪ 다양성 반응도제어계통 추가 설치 (ATWS 에 대비) ▪ 고도의 디지털 기술을 이용한 진단 및 감시계통 강화
3 단계	설계기준 이내로의 사고 제어	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 피동안전계통 설계 (운전원 개입최소화, 신뢰도 향상) ▪ 일차계통 안전감압수단 확보 ▪ 담수화설비로의 방사능 누출 배제 (추가회로)
4 단계	사고진행 방지 및 중대사고 결과 완화	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 위험도가 큰 사고경위를 체계적으로 도출하여 설계에 고려 ▪ 원자로용기 외부에 보조덮개 또는 보조용기 설치 (추가방벽) ▪ 격납용기 과압방지 또는 감압계통 설치 ▪ 중대한 노심손상사고 제어능력 구비 (수소제어, 용융물 감금 및 냉각) ▪ 일차계통 감압시설 구비 (고압의 중대사고경위 회피)
5 단계	방사성물질 유출 영향 완화	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 노심손상빈도 및 대량유출빈도의 획기적 개선 (1~4단계 개선에 의한 사고 선원향 감소) ▪ 방사선 비상계획의 단순화 (즉시 대피조치 축소 또는 배제)

5. 결 론

현재 우리나라에서 개발하고 있는 전기생산 및 해수 담수화용 SMART 원자로에 적용 가능한 심층방어 전략을 도출하기 위해, 기존 발전용원자로 및 신형원자로에서 적용된 심층방어 개념, 그 개념의 확장 및 발전, 그리고 심층방어 전략을 위한 다종의 물리적 방벽과 심층방어의 단계별 이행방안을 분석하였다. 또한, 해수 담수화용으로 현재 개발되고 있는 국외의 원자력담수화발전소의 심층방어 전략 및 대응설비들도 분석하였다.

전반적으로 원자력담수화발전소의 심층방어를 위한 물리적 방벽으로서는 기존의 방벽에 추가하여 두가지 방벽, 즉, 기존 격납용기와 더불어 원자로압력용기 외부에 보조용기를 설치하여 설계 기준사고 및 설계기준초과사고시 방사성물질의 환경 유출을 극소로 제한하고 있으며, 원자로설비와 담수화설비 사이에 추가적인 열전달 회로를 설치하여 생산용수의 방사능오염 가능성을 최소화하고 있다. 또한, 심층방어의 각 단계별 이행방안으로는 사고예방능력을 향상시키기 위해 추가적인 설계여유도의 확보, 원자로 고유안전특성의 활용, 설계의 단순화 및 주기기의 일체형 배열, 인적실수의 최소화, 계통의 신뢰도 향상 등을 설계에 반영하고 있으며, 사고완화능력을 향상시키기 위해 피동안전계통의 채택, 일차계통의 안전감압능력 확보, 환경으로의 방사능유출 제한을 위한 격납시설의 강화 등 다양한 방안이 설계에 도입되고 있다. 결과적으로 이러한 체계적인 심층방어 전략의 수립 및 이행은 원자력담수화발전소의 안전성을 상당히 증진시킬 것으로 판단된다. 따라서, 우리나라에서 개발하고 있는 전기생산 및 해수 담수화용 SMART 원자로 설계에서도 이러한 체계적이고 강화된 심층방어 전략을 수립 및 이행하여 종합적인 안전성 증진을 이루어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] IAEA, "Design and Development Status of Small and Medium Reactor Systems 1995," IAEA-TECDOC-881, 1996.
- [2] 설광원 외, "중소형원자로 안전규제요건 개발," KINS/GR-187, 한국원자력안전기술원, 1999.
- [3] IAEA, "Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants," IAEA SS No. 75-INSAG-3, 1988.
- [4] IAEA, "Convention on Nuclear Safety," IAEA LS No. 16, 1994.
- [5] IAEA, "Defence-in-Depth in Nuclear Safety," IAEA-INSAG-10, 1996.
- [6] IAEA, "Development of Safety Principles for the Design of Future Nuclear Power Plants," IAEA-TECDOC-801, 1995.
- [7] IAEA, "Implementation of Defence-in-Depth for Next Generation Light Water Reactors," IAEA-TECDOC-986, 1997.
- [8] American Nuclear Society, "Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary PWR Plants," ANS/ANSI-51.1-1983, American Nuclear Society, April 29, 1983.