

## 중수형원자로 안전성능평가지침개발 Development of Safety Performance Evaluation Guidelines for CANDU Nuclear Power Plants

이세열, 김만웅, 김병순, 이종인

한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성우체국 사서함 114

### 요 약

원전의 안전성능을 정량화된 지표로 평가하기 위해 원자력발전소에 대한 국가 및 국제적 차원의 성능지표가 개발, 활용되고 있으며 국내에서도 경수로형 원전에 대한 성능지표가 1997년 개발, 활용중에 있다. 그러나 중수로형 원자력발전소에 대해서는 경수로형 성능지표 개발 당시 원자력발전소의 운전이력이 적고 대상호기도 제한되어 있어서 성능지표의 개발을 미루어 왔다. 그러나 월성 4호기의 상업가동으로 중수로형 원자력발전소의 가동 기수가 증가됨에 따라 국내 전 원자력발전소에 대한 균형 된 성능지표의 구비가 필요하게 되었다. 중수로형 원자력발전소의 안전성능지표의 개발을 위하여 최근 국제적인 안전성능지표에 대한 개념 재정립과 국제적 동향을 분석함으로써 성능지표의 개선 방향을 정립하고 기존 경수로 성능지표에 대한 보완과 COG (CANDU Owners Group)의 성능지표를 비교, 분석하여 반영함으로써 중수로형 안전성능지표를 도출하였다.

중수로형 안전성능지표는 국제적 추세에 따라 안전성능지표의 규제활용도를 높이기 위해 안전성능지표가 평가되어야 할 영역을 우선 선정하였고, 안전성 관점에서 세부 지표들을 선정하였다. 세부지표 선정시 기존 경수로형 지표와의 균형과 중수로형 원자력발전소의 특성을 추가하도록 기본원칙을 설정하였으며, 일관성 및 형평성 유지를 위하여 외형상 경수로지표와 동일한 지표를 선정하되 지표의 정의는 중수로 특성을 반영하도록 하였다. 또한 안전성능지표의 추이변화를 Web 상에서 도식적으로 구현하기 위하여 Graphic Display Model의 개념 설계를 수행하였다.

### ABSTRACT

The importance and usefulness of safety performance indicators were recognize Korea and SPIs for Korean nuclear power plants were developed through a gove funded project in 1997 by KINS with the cooperation of the Korea Electric

Corporation (KEPCO). The PIs, currently used after one year trial application and modification, are composed of 8 indicators only for PWR plants because CANDU reactors have different characteristics with PWRs and relatively less operating experience than PWRs in Korea.

Therefore the purpose of this study is to develop SPIs (Safety Performance for CANDU reactors). Two basic directions are set in the development of CANDU. One is the balance with current PWR PIs and the others is minimizing license load. The CANDU SPIs are developed by comparing the COG PIs and current PWR PIs. Most of common indicators are selected and a couple of indicators representing CANDU characteristics are added.

Also, recent international changes of environment on SPIs are reviewed and for upgrading Korean SPIs to the international level were suggested.

## I. 서론

우리주변에서 발생하는 복잡한 현상을 보다 쉽게 이해하고 분석하기 위하여 정량화된 지표를 이용하고자 하는 노력이 많은 분야에서 개발, 활용되고 있다. 그러나 이러한 지표들은 제한적 목적에 따라 개발되었기 때문에 사용상의 한계가 있기는 하나 개발목적에 부합하는 범위내에서 충분히 의미 있는 역할을 하고 있다.

원자력 산업계에서도 원자력발전소 (이하 “원전”이라 함)의 성능을 지표화 하고자 하는 노력으로서 각 원전 수준, 사업자 수준, 국가 혹은 국제적 수준 별로 그 목적에 따라 필요한 성능지표가 개발되어 사용되어 왔다. 이에 따라 각국의 원자력 사업자, 규제기관과 국제기구에서는 원전의 성능을 분석, 감시하기 위한 도구로서 각각의 목표에 적합한 다양한 지표들을 개발하여 사용하여 왔다. 각 원전별, 사업자별 성능지표는 원전의 운전성능을 평가하여 취약부분에 대한 즉각적인 대응이나 경영진의 경영전략 및 자원분배에 도움을 주기 위해 사용되고 있다. 한편 가동원전수의 증가에 따라 축적된 운전이력은 원전의 안전운전에 중요한 정보를 제공해 준다. 특히 비정상 상태나 성능의 급격한 저하 등은 안전성 관련 심각한 사건의 선행지표가 되기도 한다. 이와 같이 안전성능과 관련한 관심으로 국가차원 (규제차원) 성능지표의 개발 필요성이 제기되었으며 많은 나라의 규제기관에서는 안전성능을 평가하기 위한 지표를 개발하여 사용하여왔다.

우리나라에서도 국가차원(규제기관)의 성능지표의 필요성이 인식되어 1995년도부터 1997년까지 2년간에 걸쳐 과학기술부의 정책과제로 경수로형 원전용 성능지표가 개발되었다. 성능지표의 선정시 국제원자력기구의 지표 선정 기준과 현재 통용되고 있는 WANO 등 국제기구의 지표 및 선도국들의 지표들을 주로 참고하였으며, 일반

적인 지표선정 기준인 안전성 관련 여부, 자료수집의 용이성, 자료의 신뢰성, 원전간의 비교성, 지표의 독립성 등을 고려하였다. 이렇게 개발된 성능지표는 우선 경수로형 원전에 대하여만 적용되었으나 '99년 10월 1일 월성 4호기가 상업운전에 들어가므로써 중수로형 원전의 가동호기수가 증가함에 따라 중수로 특성이 고려된 성능지표의 개발이 요구되었다.

중수로형 원전을 위한 성능지표 개발에 있어서 기 개발된 경수로형 원전에 대한 성능지표를 근간으로 하되 중수로의 특성을 살리고 사업자에게 추가적인 부담이 최소화 될 수 있는 방안이 모색되었다. 따라서 현재 COG (CANDU Owner's Group)에서 요구하고 있는 지표자료와 캐나다 규제기관인 CNSC에서의 접근방법이 검토되었다.

또한 성능지표에 대한 국제적 관심이 높아지고 국가간 비교사례가 증가함에 따라 성능지표의 개념도 초창기 개념에서 벗어나 단순 숫자위주(count-base)의 지표에서 위험도 개념이 포함된 지표로 변화하고 있으며 안전성능지표의 활용도 제고를 위해 안전성능지표의 규제적용, 국민에 대한 안전성능의 홍보자료로 이용, 국제공용의 성능지표 개발 등의 변화가 일어나고 있다. 이 중 대표적인 변화의 하나는 미국 NRC의 NUREG-1649 'New Regulatory Oversight Program' 으로서 그 내용은 미국내 전원전에 대한 객관적 성능평가를 통한 차등규제정책으로 요약 될 수 있으며 그 결과는 NRC Homepage를 통하여 일반국민에게 공개하고 있다. 이와 같은 세계적 동향에 따라 미국 NRC, IAEA 및 OECD/NEA 등에서 나타나고 있는 최근의 성능지표 관련 국제적 움직임을 검토하였으며 우리나라의 안전성능지표 개선 방안도 모색하여 보았다.

## II. 국제 안전성능지표 동향

중수로형 안전성능지표 개발을 위한 준비작업으로서 기존의 국내 경수로형 성능지표의 현황과 국외의 성능지표관련 기술동향을 조사하였다. 국내의 경우 '97년도에 개발된 성능지표가 시범적용을 거쳐 전 경수로원전에서 시행중이며 매년 성능지표에 대한 추이 분석과 경향에 대한 연차보고서가 발간되고 있다. 최초 개발시 개별 원전간의 비교를 목적으로 하지 않았기 때문에 호기별 추이보다는 전체 평균치와 노형별, 용량별 평균치로 계산, 분석되고 있다. 일부 지표의 경우 새로운 개념에 따라 재 정의될 필요성이 있다.

최근 국외의 동향은 국가간, 발전소간 성능지표의 비교가 활발해 지고, 원전안전에 대한 일반국민들의 관심과 정보제공 요구가 증가함에 따라 안전성능지표의 개념도 변화하고 있으며 관심도 증가하고 있다. 최근의 성능지표와 관련한 주요 안전은 안전성능지표를 통하여 운전 안전성 확보, 개별 발전소별, 국가별 안전성능지표화, 안전성능지표를 통한 국민홍보, 정성적 안전성능지표 개발, 산업안전 등과 관련한 추

가지표의 이용, 원자력산업계 외부와의 안전성 정보전달 등이 있다.

안전성능지표와 관련한 국제동향중 가장 두드러지는 것은 안전성능지표를 적극적으로 규제에 활용하고 있는 미국 NRC의 “New NRC Inspection and Oversight Program”과, IAEA와 OECD/NEA 등 국제기구를 중심으로 한 안전성능지표의 국제화가 추진중에 있다 [1,2]. 이밖에 국가들도 기존의 성능지표를 위험도정보이 반영된 안전성능지표로의 개선 및 개발을 추진하고 있다.

## 1. 미 국

NRC는 안전규제의 효율성 제고를 위하여 NEI와 공동으로 “New NRC Inspection and Oversight Program (NUREG-1649)”를 개발하여, 1999년 6월부터 9개 발전소에 대하여 시범적용하고, 2000년부터 전 원자력발전소 발전소에 대해 적용하고 있다. 이 프로그램의 주요내용은 발전소 안전과 관계되는 3대 광역분야를 설정하고 이들이 만족되기 위한 주요기반 요소(coner stone)와 기반요소의 성능을 측정할 수 있는 18개 안전성능지표로 구성되어 있으며, 각 지표는 각 원전의 PSA 결과와 접목되어 4개의 안전성능 범주(band)로 구분 (녹색, 백색, 황색, 적색) 하여, 그 결과에 따라 NRC의 규제대응을 차등화 하였다. 즉 안전성능이 우수한 발전소는 규제부담을 줄여주는 반면, 안전성능이 저조한 원전에 대해서는 규제를 강화하여 NRC가 요구하는 수준에 도달할 수 있도록 하고 있다. 또한 NRC는 안전규제검사와 안전성능지표를 연계하고, 분기별로 안전과 관련된 정보를 NRC Web을 통하여 투명하고 신속하게 일반국민에게 제공하고 있다 [3,4].

## 2. 일 본

일본의 안전성능지표는 통산성(MITI)산하 NUPEC (Nuclear Power Engineering Corporation)의 NUSIRC (Safety Information Research Center)에서 Overall Performance Indicators (OPIs)를 개발하여 관리하고 있다. 지표의 구성은 WANO의 지표를 근간으로 하고 있으며, 국가간 비교평가가 가능하게 하였으며, 일본내 원전의 안전성능 현황을 수치적으로 표현 가능하도록 하고 있다 [5].

일본에서는 보고 요건에 따라 사고후 제출되는 사건보고서와 주기적으로 사업자가 METI로 보고서를 제출한다. NUSIRC에서는 성능지표 처리와 관련된 Database를 보유하고 있으며, 보고서는 분기별 자료를 보고 받아 연간보고서로 작성하여 발간하고 있다. 보고서는 연간 경향에 대하여 10년간 자료를 제시하며 결과는 모든 원전의 평균치, BWR 및 PWR로 구분하여 도표를 제시하고 있다.

일본의 원전규제는 정기검사와 같이 기기의 성능이 승인된 기술기준과 공사기준에 적합한가하는 가를 확인하는 직접규제와 사업자의 원전 운영이 안전 요건을 준수하는가를 확인하는 감사형태의 규제가 있다. 일본에서는 WANO와 INPO 등에서 개발된 성능지표를 참고로 8개의 성능지표를 사용하여왔다. 이들 지표들은 직접적인 규

제수단으로 활용하지는 않고 있다. 그러나 '99년 JCO 사건이후 감사형태의 규제가 강화되고있으며 이에따라 일본 NUPEC에서는 감사형태의 규제중 하나로서 새로운 성능지표를 개발중에 있다. 안전성 보증을 위해 필요한 성능분야들이 검토되었으며 이들중 성능지표를 선정하였으며 평가방법과 판단 기준에 대한 연구가 진행중이다.

### 3. 프랑스

프랑스 원전은 단일 사업자이며 표준화가 되어있기는 하나 용량 및 핵연료주기 등에서 차이를 보이고 있다. 따라서 프랑스 규제기관에서는 정량적인 지표와 정성적인 분석을 통해 각 발전소의 장단점을 파악하고 이에따른 대응전략을 수립하고 국가수준의 경향을 파악하는 절차를 수립하고 있다. 이러한 절차는 'monograph'라고 불리우는 발전소별 문서로 평가하는데 여기에는 정량적인 지표와 정성적인 발전소 정보가 모두 포함된다. 프랑스 규제기관은 이와 같은 절차를 보다 개선하여 각각의 정량적인 지표와 정성적 정보를 연계하여 종합적인 성능파악을 하고자 하고 있다.

이를 위해 현재 9개 chapter로 되어있는 monograph가 11개 chapter로 개편 될 것이며 여기에 사용될 새로운 지표 set를 개발중이다. 새로운 지표의 개발을 위해 PSA 결과가 이용되고 있다. 각각의 지표는 5단계로 (not acceptable, acceptable, standard, good, excellent) 구분되어 종합적 성능평가에 이용될 것이다.

### 4. 캐나다

캐나다의 경우에는 성능지표를 개발중에 있으며 현재까지는 필요에 따라 특정 인자(parameter)를 선정하여 분석(Trend Analysis)하는 체제로 되어있다. 캐나다발전소는 매 2년마다 허가 갱신이 되고 있으며 이의 심사시 실무부서의 요청에 따라 선정된 인자에 대하여 분석을 수행하여 허가 갱신을 위한 판단자료로 사용하고 있다.

이와 같은 분석을 위한 자료는 주재원의 일상검사 결과, CNSC 정규감사, 중대 혹은 비정상 사건의 CNSC 검사 결과, 성능개선 노력의 적절성 (사업자 자체 성능인자에 따른 평가), 시정조치이행의 적합성 평가 (중대 혹은 비정상상태에 대한 사업자 평가), 사업자 시정조치 이행 절차 평가, 사건보고서 (SER)에 근거한 독립적 사건 분석 등의 자료를 이용하고 있다 [6].

### 5. IAEA

원자력국제기구인 IAEA에서는 중국 Daya Bay 발전소 등 4개 국가들이 pilot plant로 참여한 국제공동연구(CRP)를 통하여 안전성능(safety performance), 위험도 및 안전문화가 포함된 안전성능지표개발프로그램을 완수하였으며 [7]. 2000년 10월 OECD/NEA와 공동으로 스페인 마드리드에서 'PI Specialist Meeting'을 개최하여 규제자, 사업자 및 학계의 성능지표 관련 전문가들이 성능지표와 관련한 의견교환의 장을 마련한바 있다. NEA는 규제차원에서의 성능지표 이용에 관한 연구를 진

행해 왔으며 (WG on inspection practices of CNRA) 국제통용 PI시스템 (IPIS)의 수립을 정식 의제로 제안하였다 (WG of Operating Experience and Human Factors, CSIN)

## 6. WANO

체르노빌 사고 이후에 창설된 WANO는 원자력발전소 성능지표의 국제적 표준화를 목표로 1990년 안전성, 신뢰성, 효율과 직원 안전등의 분야에 대한 10가지 성능지표를 확립하였다. 이러한 표준화의 목적은 운전경험 정보의 공유에 따른 확증된 자료와 발전소 성능의 비교가 필수적이라는 인식에 근거하였을 것이고 불일치하는 데이터에 의한 혼란 및 부적절한 결론을 배제할 수 있는 것을 기대하였기 때문 일 것이다. 성능지표 개발에 대한 이력을 간략하게 요약하면 1989년 5월에 10개의 draft지표를 선정하여 1990년 1월부터 자료수집을 착수하였으며 1990년 4월경 프로그램에 대한 정책지침을 확정하였다. 1990년 5월에 본부인 Atlanta Center에서 성능지표 관련 Database를 개발하였으며 1990년 6월에 최초 보고자료를 접수하였다. 1990년 10월에 Database 확립 및 자료입력을 완성하였으며 1991년 4월 최초 WANO 성능지표 보고서를 발간하였다.

관련자료는 회원 사업자로부터 지역사무소를 통하여 분기별로 입수하고 지역사무소에서 계산방법 등 자료를 검토한 후 Atlanta Center로 전달하고 년간보고서 형태로 발간되고 있다. 상세 자료를 비롯한 발전소별 현황자료는 비공개 원칙에 따라 보안이 유지되고 자료 공개시에는 해당 사업자의 동의 절차가 요구된다. 자료는 발전소별로는 공개되지 않으며 자료의 특성에 따라 세계평균, Median, Mean등의 값으로 제시되며 Histogram 형태로 도시된다.

WANO는 1989년부터 성능지표를 이용하여 전세계적인 발전소 성능추이, 각발전소별 성능추이 등 회원발전소의 성능이 WANO의 목표치에 얼마나 근접하고 있는가를 평가해왔다. 최근 WANO는 그간 사용해오던 지표 중 지표로서의 효용성이 없다고 판단되는 방사능 물질 생성지표를 폐지하였다.

### III. 중수형 원자로 안전성능지표개발

중수로형 안전성능지표의 개발은 국내원전의 성능지표 개선과 관련한 전체 틀 안에서 고려되었다. 즉, 규제체도의 개선과 함께 안전성능지표의 규제활용도가 높아질 것과 국민 홍보역할의 증가 등이 지표개발시 고려되었다. 첫 번째로 안전성능지표가 다루어야할 영역에 대한 평가가 이루어졌다. 이영역은 일반영역, 원자로 안전영역 및 방사선 안전영역으로 선정되었으며 이들 영역별로 평가 되어야할 범주가 결정되었으며 마지막으로 이들 범주를 측정할 수 있는 구체적인 지표가 선정되었다. 구체적인 지표의 선정은 기존의 경수로 지표와 COG 지표를 참고하였으며 필요한

지표중 추가 개발이 필요한 것은 추후 개발토록 하였다.

## 1. 성능지표별 영역개발

성능지표의 선정에 있어서 성능지표로 나타낼 수 있는 양이 원전안전의 전 분야를 균형 있게 대표 할 수 있는 가를 분석하는 것은 매우 중요하다. 만일 성능지표가 특정 분야에 치우치거나 안전에 중요한 분야를 누락할 경우 성능지표의 기능과 목적이 충분히 달성 될 수 없을 뿐 아니라 운전원이나 일반인에게 잘못된 정보를 제공하여 운전원이 지표관련 성능만을 우선시 하도록 오도하므로써 안전성에 저해가 될 우려도 있다.

따라서 성능지표가 원전의 안전성을 균형 있게 나타내는 대표성 있는 지표가 되기 위해서는 원전 안전과 관련하여 확인되어야 할 분야가 우선적으로 선정되어야 하며 각 분야를 대표할 수 있는 지표가 선정되어야 한다. 따라서 원전의 안전성능 확인하기 위해 평가해야 하는 영역을 다음과 같이 구분하였다. 첫 번째로는 일반안전 분야이다. 이분야는 안전성과 직접적인 관련은 없으나 발전소의 운전, 보수와 관련하여 종합적인 안전을 평가할 수 있는 분야이다. 두 번째로는 원자로안전분야로서 원자로 안전과 관련된 발생사건, 원자로 안전성을 확보하기 위한 안전방벽의 건전성 및 사고발생시에 대비한 사고완화계통의 신뢰성이 포함된다. 안전방벽중에는 가장 최초의 방벽인 핵연료 건전성부터, 일차 냉각재 계통 건전성, 격납용기 건전성 및 최후의 방벽으로서 비상대책이 포함될 수 있다. 다음으로 평가되어야 할 사항이 발생사건 (Initiator) 및 사고완화 기능이 있다. 마지막으로 평가되어야 할 영역은 원전안전의 궁극적인 목표인 방사선 안전이며 여기에는 원전종사자 방사선 안전과 관련된 소내 방사선 안전과 주민과 환경관련한 소외 방사선 안전이 포함 될 수 있다.

표 1 에서 보는 바와 같이 기존의 경수로 지표 [8]는 안전성능지표의 구성영역 중 '격납용기', '비상대책' 및 '소외 방사선 안전'에 대한 지표가 누락되어 있다. 그러나 원전안전에 직접 관련은 없으나 간접적인 운전성능평가 지표가 될 수 있는 '이용율', '원자로 비가동시간', '폐기물 발생량' 등이 포함되어 있다. 따라서 균형 있고 보다 완전한 성능지표가 되기 위해서는 현재 미개발된 분야의 성능지표가 개발되어야 할 필요가 있다.

## 2. COG 성능지표 분석

기존의 경수로형 원전에 대한 성능지표를 중수로 성능지표로 활용하는 것의 적합성과 가능성을 평가하기 위하여 경수로 성능지표와 COG 성능지표를 비교하였다. COG 성능지표는 현재 총 16개 성능지표로 구성되어 있으며 추후 약 30~40개 성

능지표로 확대해 나갈 계획이다. 성능지표는 WANO 성능지표 9개와 Ontario Power Generation(OPG)에서 성능지표로 활용하고 있는 7개 성능지표로 구성되어있다.

대부분의 기존 경수로지표는 COG 성능지표중 일부로 포함되어있는 점과 추후 안전성지표 개선 계획을 감안하여 중수형원전을 위한 성능지표 개발에 있어서도 2가지 중요 방향이 설정되었다. 첫째, 기존의 경수로형 성능지표와 크게 차이나지 않아야 한다는 것과 둘째, 사업자에게 추가부담을 최소화 할 수 있어야 한다는 것이다.

표. 2에서 보는 바와 같이 COG 지표는 대부분의 경수로 지표를 반영하고 있다. 따라서 중수로형 성능지표의 개발방향인 경수로지표와의 유사성과 사업자 추가 부담의 경감을 위해서 또한 원전간 비교가능성을 위해서 대부분의 경수로 지표를 중수로형 지표로 사용하는 것이 타당하다고 판정된다. 그밖에 일부 COG 지표중 안전성과 관련한 지표의 반영여부를 검토하였다.

첫 번째로 COG 지표중 임시상태 발생이 고려되었다. 임시상태란 승인된 절차서나 도면없이 시험, 점검 또는 보수 작업을 위해 단자개방, 제어카드인출 또는 밸브배열 변경 등의 방법으로 설비상태를 임시로 변경하는 조치를 말하며 이는 한전 표준기행 정비-01에 따라 전원전에서 수행중인 업무로서 중수로형 원전 성능지표의 대표성을 나타내지 못하고 또한 운전성능 또는 안전성을 나타내는 지표가 아니므로 중수형 성능지표에서 제외함이 타당하다는 의견을 있어 이를 검토한 결과 COG 지표에 포함되어 있기는 하나 중수로의 대표성이 미약하므로 제외기로 결정하였다.

두 번째로 중수로 특성상 중수와 관련한 지표가 고려되었다. 중수관련 사항은 사회적으로 민감한 사안이므로 중수관련 지표의 사용에 대해 사업자 측과 많은 논란이 있었으나 중수로의 특성상 중수와 관련된 지표가 추가될 필요성이 있다고 판단하였다. 이 경우 중수로에만 적용되는 지표이므로 경수로 지표와의 형평성을 고려해야 한다.

중수와 관련된 지표로 COG 지표중 누출(Spill)을 생각할 수 있다. 그러나 COG 지표중 누출은 중수 뿐아니라 기타 환경에 영향을 미치는 독성 물질을 포함하는 지표로 선정되어 있으므로 순수하게 중수누출과 관련된 지표로 보기 어렵다. 대안으로 중수의 소모량을 간접적으로 측정할 수 있는 중수회수율을 생각할 수 있다. 중수회수율은 계통에서 빠져나온 중수량중 소모량을 제외한 총 회수된 중수의 비율을 말하며 여기에는 비정상적으로 누설된 중수, 시험 및 정비를 위해 인위적으로 배수된 중수, 계통 수질분석을 위해 채취된 시료중수 및 기타 기체중수 회수계통을 통해 회수된 중수가 포함된다. 즉, 회수중수는 비정상적인 누설중수와 정상운전중에 사용된 중수 전체를 칭하고 있다. 또 하나의 대안으로 현재 1차냉각재 계통 건전성 지표로 경수로지표에서 사용중인 냉각재 누설율을 사용하는 방안이 고려될 수 있다. 누설율은 냉각재인 중수의 소모량 및 회수율로 계산된다. 그러나 이 경우 감속재 중수의 누설은 누락되는 단점이 있다.



### 3. 중수형 안전성능지표 선정

기존의 경수로형 성능지표는 폐기물지표를 제외하고는 대부분 개선 체제의 틀안에 포함되며 COG 지표와도 모순되지 않는다. 또한, 개선체제에서는 발전소간 비교와 균형이 중요한 요소가 되므로 이를 위해서는 기존중수로 성능지표 중 중수로형에 적용 가능한 지표는 최대한 활용되어야 할 것이다. 다만 중수로 특성에 필요한 지표의 추가 혹은 대체적용이 문제로 남게 된다. 중수로의 특성상 중수와 관련한 지표가 포함되는 것이 타당할 것으로 판단되나 이 경우 중수와 관련된 사회적 민감도와 경수로와의 균형이 고려되어야 한다. 중수와 관련하여 안전성관련 사항은 냉각재 혹은 감속재의 누설이며 이 경우 안전방벽 (1차 냉각재 계통 건전성) 건전성 및 삼중수소에 의한 소내외 방사선 피폭 등이다. 그러므로 별도 (explicit)의 중수지표를 선정하기보다는 기존 지표에 반영하는 것이 지표의 일원화 측면에서 유리한 점이 있다.

따라서 중수형 성능지표는 개선 안전성능지표의 틀안에서 외형상 경수로 지표와 같이 하므로써 일관성을 유지하되 지표의 정의는 냉각재 뿐 아니라 감속재의 누설을 포함하여 중수로의 특성을 반영하는 안으로 결정되었으며 필요시 출력감발 등 추가 지표들을 개발할 예정이다. 선정된 지표는 다음 표 3과 같다.

지표중 중수로 특성이 가미될 수 있는 지표는 중수로 특성을 가미하여 새롭게 정의될 수 있는데 예를 들어 '1차냉각재 계통 건전성' 지표의 경우 경수로지표는 '년평균 원자로 냉각재계통의 미확인 누설율'로 정의되나 중수로의 경우는 '년평균 열수송계통 및 감속재계통의 미확인 누설율'로 정의될 수 있다.

### 4. Graphic Display Model 개발

성능지표 체제의 개선과 함께 이를 보다 효과적으로 활용할 수 있는 방안으로서 Graphic Display Model의 개발이 고려되었다. 기존의 성능지표체제가 지표별로 성능 수준에 대한 기준이 없어서 성능지표값 자체만으로는 성능목표의 달성여부확인이 어려울뿐 아니라 동일한 값이라도 각 발전소별 위험도에 미치는 영향이 다를수 있으므로 해당 발전소의 성능목표 달성여부나 발전소간 수평적인 비교에 어려움이 있었다. 따라서 성능지표별 목표값 혹은 지표별 성능등급의 설정으로 성능목표의 달성 여부, 성능수준의 안전심각성 등을 손쉽게 파악할 수 있어야 성능지표의 이용성을 극대화 할 수 있다.

이를 위해서는 위험도 평가를 통한 성능 목표치 혹은 성능등급의 경계값 등이 설정되어야 하나 집적선량 등 일부 지표의 경우 지표의 특성상 이와 같은 목표치를 정하기가 어려운 경우가 있으며 현재는 이를 위한 기반이 충분히 확보되지 않아서 위

협도 계산에 의한 구체적인 경계값을 설정 할 수는 없으나 장기적으로 이와 같은 성능목표치 혹은 성능 등급 설정을 목표로 하여 Graphic Display Model이 개발되었다. 성능등급은 만족, 주의, 경계 및 불만족의 4단계로 설정하였으며 한시적으로 그간의 통계치와 기술지침서의 제한치를 근거로 일반적인 경계값의 기준을 설정하였다. 즉, 만족/주의 경계값은 안전여유도를 기준으로 하였으며, 주의/경계는 운전 제한조건, 경계/불만족은 운전제한 조건의 초과 정도로 정하였다. 이들 경계값은 추후 PSA 결과와 시범운영결과를 반영하여 확인 및 재조정될 예정이다. 성능등급은 등급별 color coding을 통해 구분이 되도록 하였으며 이를 바탕으로 Graphic display model의 proto-type이 구성되었다.

## VI. 결 론

안전성능지표의 개념 변화와 국제적 변화 조류에 따라 안전성능지표의 활용도 증진을 위한 안전규제체제 개선의 일환으로 중수로형 원전용 안전성능지표를 개발하였다. 이들 지표의 개발로 가동중인 국내 전 노형에 대한 성능지표집합 (Safety Performance Indicator Set)이 형성되었으며 이를 통해 안전성능의 평가와 비교가 가능하게 되었다. 향후 본 연구의 결과로 형성된 중수로형 안전성능지표가 기초가 되고 안전성능지표 개선 계획의 틀안에서 추가 지표의 개발과 정비를 하여 국내 전 원전의 안전성능을 평가하는 방법의 하나로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구결과 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 중수형 원전 안전성능지표는 안전성능을 3개 분야로 선정하였으며, 각 분야에 대하여 성능측정 범주를 선정하였다. 범주 선정시에는 범주간, 노형간 균형을 고려하였고, 이들 범주에 대한 세부 측정지표를 선정하였다.
2. 또한, 안전성능의 추이에 대한 Graphic Display를 위한 Proto-type Graphic Display 모델을 개발하여, 이를 토대로 향후 안전성능 Graphic Display를 개발할 예정이다. 이를 통하여 안전성능지표의 활용도를 증진할 예정이다.
3. 원전 안전에 대한 국민의 관심과 정보제공 요구의 증가에 부응하기 위하여 정량화된 안전성능지표를 Web을 통해 Graphic Display로 상시 공개함으로써 원전안전에 대한 신뢰도도 향상 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- [1] OECD/NEA, "Performance Indicators and Combining Assessments to Evaluate the Safety Performance of Licensees", NEA/CNRA/R(98)3, 1998.

- [2] IAEA/OECD-NEA, "Safety Performance Indicators", Proceedings of IAEA/NEA Specialist Meeting on Safety Performance Indicators, Madrid, Spain, October 17-19, 2000.
- [3] US NRC, "New NRC Reactor Inspection and Oversight Program", NUREG-1649, 1999.
- [4] NEI, 'Regulatory Assessment Performance Indicator Guideline,' NEI 99-02, 1999.
- [5] KINS, "Safety Performance Indicators", Proceedings of 6th KINS-NUPEC Technical Information Exchange Meeting, 2001
- [6] CNSC, Event Assessment Report 00-EIS-01 Darlington Trend Identification from significant Report (1997-1999), 2000
- [7] Operational safety performance indicators for nuclear power plants (IAEA-TECDOC-1141), IAEA, 2000.
- [8] 이세열 등, '국내 가압경수로 원전 성능지표 분석,' KINS/AR-729, 2000.

표 1. 안전성능지표의 구성 영역

영역	범주	지표	비고
일반성능	운전	<ul style="list-style-type: none"> <li>이용율</li> </ul>	
	보수	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자로 비가동시간</li> </ul>	
원자로 안전	발생사건	<ul style="list-style-type: none"> <li>비계획 정지</li> <li>비계획 출력변동</li> </ul>	개발중
	사고완화계통	<ul style="list-style-type: none"> <li>안전주입계통</li> <li>비상발전기</li> <li>보조급수 계통</li> </ul>	개발중
	안전방벽	<ul style="list-style-type: none"> <li>핵연료 건전성</li> <li>1차냉각재 계통 건전성</li> <li>격납용기 건전성</li> <li>비상대책</li> </ul>	개발중
방사선안전	소내방사선안전	<ul style="list-style-type: none"> <li>방사선 집적선량</li> </ul>	
	소외방사선안전	<ul style="list-style-type: none"> <li>ODCM 결과</li> </ul>	

표 2. 국내 경수로형 성능지표의 분석표

성능지표 구성영역	항목	경수로 지표
다중방호벽	핵연료	핵연료 건전성
	1차냉각재계통	1차냉각재계통 누설율
	격납용기	없음
	비상대책	없음
발생사건 및 사고완화계통	발생사건	불시정지건수
	사고완화계통	안전계통 작동 횟수 - 안전주입 - 비상발전기 기동
방사선 안전	소내방사선 안전	방사선 집적 선량
	소외 방사선 안전	없음
일반 성능	안전성과 직접관련은 없으나 일반적인 운전 성능평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>이용율</li> <li>원자로 비가동 시간</li> <li>폐기물발생량 (고체, 액체, 기체)</li> </ul>

## 안전성능지표

### SPI : Safety Performance Indicator

**안전성능지표란? (What is SPI?)**

**안전성능지표의 구성 (SPI set)**

**I. 일반성능 영역**

가. 이용율

나. 원자로 비가동율

**II. 원자로안전 영역**

II-1. 발생사건

가. 비계획 원자로정지

나. 비계획 출력변동

II-2. 사고완화 계통

가. 비상 전원계통

나. 안전주입계통

다. 보조급수 계통

II-3. 다중방호벽

가. 핵연료

나. 1차 냉각재계통

다. 격납용기


라. 비상대책

**III. 방사선안전 영역**

가. 소내 방사선 안전

나. 소외 방사선 안전

**안전성능지표 보기**



**한국원자력안전기술원 규제분석실**

그림 1 Graphic Display Model 화면 (예: 초기화면)

전 원전 안전 성능 현황 (기간: 2001.1.1 ~ 2001.6.30)

호기	안전성능지표												
	일반성능		원자로 안전									방사선안전	
	이용율	비가동율	발생사건		사고완화계통			다중방호벽				소내	소외
		원자로 정지	출력변동	비상 전원	안전주입	보조급수	핵연료	1차냉각재계통	격납용기	비상대책			
고리 1	●	●	●	●	●	●	개발중		●	개발중	●	●	●
고리 2	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
고리 3	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
고리 4	●	●	○	●	●	●		●	●		●	●	●
영광 1	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
영광 2	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
영광 3	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
영광 4	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
울진 1	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
울진 2	●	●	●	●	○	●		●	●		●	●	●
울진 3	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
울진 4	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
월성 1	●	●	●	○	○	●		●	●		●	●	●
월성 2	●	●	●	●	○	●		●	●		●	●	●
월성 3	●	●	●	○	●	●		●	●		●	●	●
월성 4	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
전호기평균	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●

그림 2 Graphic Display Model 화면 (예: 전원전 성능현황 화면)

고리 1호기

이용율 (Capability Factor)

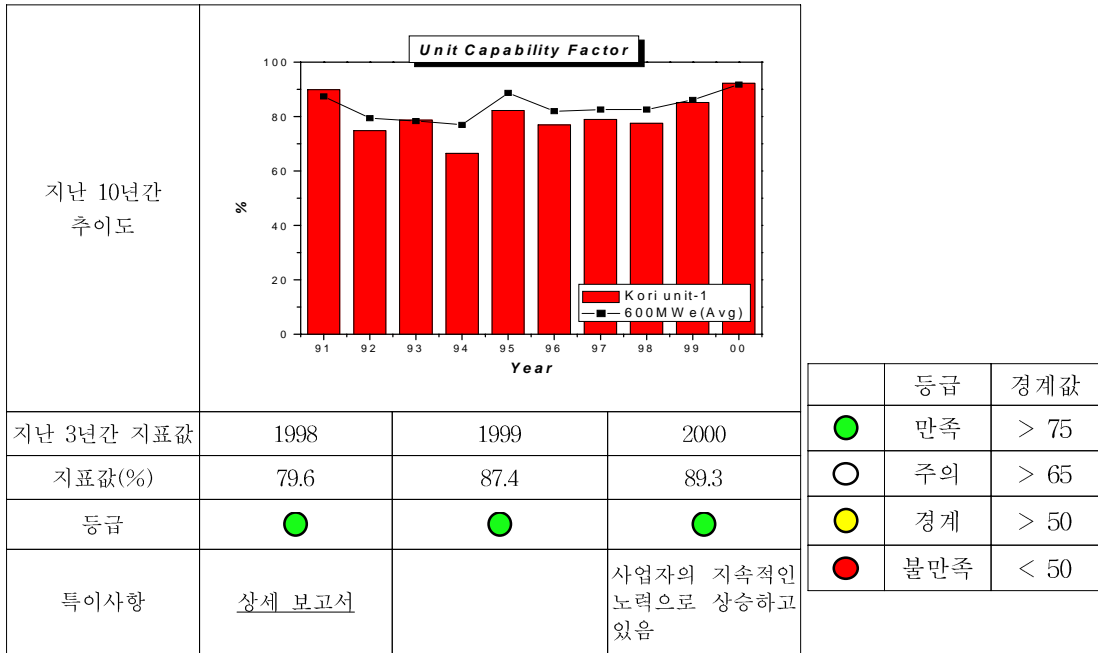


그림 3 Graphic Display Model 화면 (예: 지표별 상세 화면)