

규제관점에서 본 원자로 열출력 한계

Reactor Thermal Power Limit in a Regulatory Perspective

어근선, 안승훈, 우승용, 박준상, 류용호

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

원자로 설계, 운전 및 안전에서 원자로 열출력은 기본이 되고 기준이 되는 항목이다. 대부분의 원자로 설계 및 운전은 100%출력인 정격 열출력을 기준으로 하여 이루어진다. 그러나 원자력발전소에서 이 정격 열출력을 어떤 한계로 어떻게 지키며 운전해야하고 그 근거가 무엇인지 명확하게 정리되어 있지 않기 때문에 이에 대한 것들을 정리하였다. 아울러 국내 CANDU형, Westinghouse형, Framatome형 및 ABB-CE형 원자로에서 원자로 열출력 한계를 어떻게 지키며 운전하고 있는지를 소개하였으며, 이들을 비교해 볼 때 On-line 감시계통인 COLSS를 이용하여 원자로 정격 열출력을 넘지 않게 운전하고 있는 ABB-CE형 원자로가 규제관점에서 바람직하게 원자로 열출력 한계는 지키며 운전하고 있음을 알 수 있었다. 아울러 원자로 열출력 한계와 관련된 지금까지 알려진 규제입장도 정리하여 제시하였고 열출력 한계준수와 관련한 개선 움직임들을 소개하고 바람직한 방향들도 제시하였다.

Abstract

The reactor thermal power is the basic reference parameter in the reactor design, operation and safety. Most plant designs and operations are performed for the 100% rated thermal power. Since the value and meaning of the thermal power limit, and reactor operation method to observe it are not clearly documented, they are presented here. It is also shown how the reactor thermal power limit is presently respected in the plant operations of the domestic CANDU, Westinghouse, Framatome and ABB-CE type reactors. From this, it can be said in a regulatory perspective that ABB-CE type reactors are operating in a recommendable way of not exceeding the reactor thermal power limit using an on-line monitoring system of COLSS. Also USA and Korea regulatory positions on the reactor thermal power limit are summarized and presented. Finally, improvement items for better reactor thermal power limit observation are presented along with recommendation items.

1. 서론

원자로 설계, 운전 및 안전에서 원자로 열출력은 기본이 되고 기준이 되는 항목이다. 거의 모든 원자로 기기 및 계통의 설계가 100% 출력인 정격 열출력을 기준으로 하여 이루어지고, 핵연료 연소도 계산 또는 추정에도 원자로 열출력이 사용된다. 대부분의 원자로가 100% 출력으로 운전되기 때문에, 특별한 사항이 없으면 운전시간 및 100% 정격 원자로출력을 사용하여 연소도 계산을 한 후 핵연료 운전이력이나 핵연료 주기비 계산 등에 활용한다. 아울러 대부분의 사고해석이 열출력이 높은 상태에서 발생할 경우 제한적이기 때문에 대부분의 설계기준 사고해석은 100% 출력에 일정한 값을 고려하여 사고 시작점의 원자로 출력으로 사용한다. 즉 정격 열출력은 사고해석의 초기조건에 사용된 값으로서 이 사고해석 초기조건 하에서 원자로를 운전할 때 최종 안전성분석보고서의 내용이 유효한 것이다. 이렇게 기준이 되는 정격 열출력을 어떤 한계로 어떻게 지키며 운전해야 하고, 그 근거가 무엇인지 명확하게 정리된 적이 없기에 이에 대한 것들을 정리하고자 한다. 또 국내에서 운전되고 있는 CANDU형, Westinghouse형, Framatome형 및 ABB-CE형 원자로에서 원자로 열출력 한계를 어떻게 지키며 운전하고 있는지를 소개하고 원자로 열출력 한계와 관련된 지금까지 알려진 규제입장도 정리하여 제시하였다. 아울러 열출력 한계준수와 관련한 개선 움직임들을 소개하고 바람직한 방향들도 제시하고자 한다.

2. 설계 및 운전관련 사항

2.1 CANDU형 원자로

국내에서 운전되고 있는 CANDU형 원자로의 대표로 월성 3호기를 예를 들어 소개하고자 한다. 운영기술지침서[1]의 부록인 세부기술지침서 1.60절에서 “정격 열출력은 원자로 냉각재로 전달되는 전체 노심 열전달을 2061.4 MW(t)을 뜻한다(증기발생기로 전달되는 순 열전달율은 2064 MW(t)임)”로 기술되어 있어 실제 운전시 노심열출력 2061.4 MWth 및 증기발생기 열출력 2064 MWth이 100% 출력인 정격 열출력임을 이야기하고 있다. 아울러 세부기술지침서 표 2.2-1의 증기발생기 저수위트립의 설정치가 100% FP(Full Power)에서 1.74m로 명시하고 그 이상의 출력에서는 제시하지 않아 100% 까지만 운전이 가능함을 암시하고 있다. 최종안전성분석 보고서 15.2.1.1.A-8쪽 [2]에서 “운전여유도를 갖는 103% 전출력 상태에서 운전될 때 냉각재상실사고가 발생한다고 가정한다”로 명시하여 사고해석을 103% FP에서 시작하였음을 이야기하여 100% 정격 열출력에 3%를 더하여 사고해석을 함을 알리고 있다.

이 값은 원자로 출력의 지시치가 100%를 지시할 경우 실제출력이 기준열출력측정 불확실도($1\sigma = 1.04\%$)[3]의 1.645σ 및 drift를 더한 값이 될 수 있으므로 이를 염두에 두고 산출한 것으로 실제 운전 중에 원자로 열출력 감시용으로 사용하고 있는

RRS(Reactor Regulating System)의 증기발생기 열출력 지시치가 비록 100%이라고 하더라도 이들 오차를 고려하면 실제 원자로의 출력이 이보다 높을 수 있으므로 103%로 사고해석을 수행하였음을 의미한다. 만약 RRS의 증기발생기 열출력 지시치가 사고해석 초기 값인 103%가 되게 운전하면 원자로의 실제출력은 103%를 중심으로 더 높거나 낮은 값(예: 104%, 102%) 될 수 있다(분포가 대칭이라면 103%를 초과할 확률이 1/2이다). 월성 3호기에서는 월1회 Off-line 증기발생기열출력(TPC: Thermal Power Calibration)을 계산하여 원자로제어계통(RRS: Reactor Regulating System)의 증기발생기 열출력을 점검하고 필요시 교정하고 있다[4]. 즉 RRS의 증기발생기 열출력과 TPC 증기발생기 열출력이 0.5% 이상 차이가 나면 0.5% 이내로 RRS의 증기발생기 열출력을 교정할 것을 요구하며, 이때 TPC 값이 “안전제한값” 101% FP(2083.63 MWth)를 초과하는지 확인하여 초과시 RRS의 Demand Power를 100% FP에서 초과되는 양만큼 낮추도록 하고 있다.

2.2 Westinghouse형 원자로

국내에서 운전되고 있는 Westinghouse형의 원자로의 대표로 영광 1,2호기를 예를 들어 소개하고자 한다. 기술지침서[5] 16.1.28에서 “RATED THERMAL POWER shall be a total reactor core heat transfer rate to the reactor coolant of 2775 MWt”라는 표현으로 100% 출력인 정격 열출력을 2775 MWth로 정의하고 있다. 아울러 예를 들면 기술지침서 16.3.2.3.1절에서 $F\Delta H$ 와 관련하여 “ $1.0+0.3(1-F)$ ”라는 표현으로 그 이상의 출력에서는 제시하지 않아 100% FP까지만 운전이 가능함을 암시하고 있다. FSAR 15.0.3.2[6]에서 “the initial conditions are obtained by adding the maximum steady state errors($\pm 2\%$ allowance for metric errors for core power) to rated values” 라고 명시하여 100% 정격 열출력에 2%를 더하여 사고해석을 시작함을 알리고 있다(DNB 관련 사고해석에는 DNBR 제한값 생산에 2%의 출력불확실도를 고려함).

Westinghouse형 원자로의 경우 핵중기공급계통의 1, 2차측 열평형 변수를 1일마다 취득하여 핵계장(NIS: Nuclear Instrumentation System) 출력과 Off-line 증기발생기 열출력에 의한 출력 차이가 기술지침서에서 요구하는 값인 2%(기술지침서 Table 16.4.3-1[6])보다 클 때 NIS를 교정한다. 이러한 NIS 출력을 감시함으로써 운전원은 발전소가 허가된 출력 이내에서 가동되는지를 확인한다.

2.3 Framatome형 원자로

국내에서 운전되고 있는 Framatome형의 원자로인 울진 1,2호기를 예를 들어 소개하고자 한다. 기술지침서[7] 16.2.1에서 “Operation at a core thermal power value limited to 2775 MWt”라는 표현으로 100% 출력인 정격 열출력 2775 MWth를 넘지 못

하게 요구하고 있다. FSAR 15.0.3.2[8]에서 "the initial conditions are obtained by adding the maximum steady state errors($\pm 2\%$ allowance for metric errors for core power) to rated values" 라고 명시하여 100% 정격 열출력에 2%를 더하여 사고해석을 시작함을 알리고 있다(DNB 관련 사고해석에는 DNBR 제한값 생산에 2%의 출력불확실도를 고려함).

Framatome형 원자로의 경우 핵중기공급계통의 1, 2차측 열평형 변수를 1일마다 취득하여 핵계장(NIS: Nuclear Instrumentation System) 출력과 Computer의 증기발생기 열출력에 의한 출력 차이가 기술지침서에서 요구하는 값인 2%(기술지침서 Table T-16.11[7])보다 클 때 NIS를 교정한다. 그리고 Computer의 증기발생기 열출력은 1개월에 한번씩 정확도를 체크한다[7]. 이러한 NIS 출력을 감시함으로써 운전원은 발전소가 허가된 출력 이내에서 가동되는지를 확인한다.

2.4 ABB-CE형 원자로

국내에서 운전되고 있는 ABB-CE형 원자로의 대표로 울진 3,4호기를 예를 들어 소개하고자 한다. 운영기술지침서의 부록[9] 1.22절에서 "정격 열출력은 원자로 냉각재로 전달되는 전체 노심 열전달률로서 2815 MWt 이다"로 기술되어 있어 실제 운전시 노심열출력 2815 MWth이 100% 출력인 정격 열출력임을 이야기하고 있다. 아울러 예를 들면 운영기술지침서의 부록에 있는 그림 3.1-4(제어봉 삽입 한계 대 열출력)에 100% 출력까지만 명시하여 100% 출력까지만 운전이 가능함을 암시하고 있다. 최종 안전성분석 보고서 표 15.0.3-1(사고해석의 초기조건)[10]에서 노심 출력의 범위를 2815 MWth의 0%에서 102%까지로 한정하여 초기출력이 높을수록 제한적인 사고해석들을 102% FP에서 시작함을 이야기하여 100% 정격 열출력에 2%를 더하여 사고해석을 시작하였음을 알리고 있다.

ABB-CE형의 경우 정격 열출력의 100 퍼센트에 도달하면 노심운전제한감시계통(COLSS: Core Operating Limit Supervisory System[15])에서 경보를 주기 때문에 통상 정격 열출력의 100 퍼센트 이하로 유지하면서 운전하고 있다. COLSS는 핵중기공급계통의 1, 2차측 열평형 변수를 실시간으로 취득하여 신뢰성 있는 열출력 값을 생산하므로 ABB-CE형의 경우 정격 열출력은 높은 신뢰도와 정확도를 가지고 감시되고 있다고 볼 수 있다. COLSS에서 계산하는 출력 지시 변수는 세 가지로서 일차측열출력(Primary Calorimetric Power: BDELTA), 이차측열출력(Secondary Calorimetric Power: BSCRAW) 및 터빈출력(Turbine Power: BTFSP)이 있다. 이러한 출력 지시 변수를 사용하여 Noise와 응답 시간이 고려된 Filtering Logic을 거쳐서 Filtered Power(각각 BDELTF, BSCAL, BTFSPF)를 생산한다. 참고로 영광 3, 4호기 COLSS의 경우는 BDELTA, BTFSP에 대한 Filtered Power가 없다. BSCAL값의 건전성(Quality)이

“Good”일 경우, 위의 BDELTF와 BTFSPF를 BSCAL값으로 교정한 Calibrated BDELTF (CBDELTF)와 Calibrated BTFSPF(CBTFSPF) 중 큰 값을 발전소의 출력 준위 (Filtered Plant Power: PPF)로 결정하도록 되어 있다. 이러한 PPF값의 100초 평균값이 Smoothed Filtered Plant Power(PFFS)이며 이를 인허가 출력 제한치(License Power Limit: LPL = 100%)와 비교하는 것이다. 이는 기존의 영광 3, 4호기 COLSS에 적용된 Plant Power (PP = Max (CBDELTF, CBTFSPF)) 선정 방법에 Filtering Logic을 도입하여 개선한 Algorithm으로서, 올진 3,4호기에 처음 적용된 개념이다.

3. 원자로 열출력 한계 관련 규제입장

원자로 열출력 한계관련 미국 NRC의 내부입장은 아래와 같이 요약할 수 있다[11]:

- The average power level over any eight hour shift should not exceed the full steady-state licensed power limit,
- In no event should power be allowed to exceed 102% of licensed power limit,
- Operation up to 102% is permissible for as long as 15 minutes,
- Operation up to 101% is permissible for as long as 30 minutes, and
- Operation up to 100.5% is permissible for as long as 60 minutes, etc.

그리고 예를 들면 SONGS-2,3 발전소에서는 위의 요건들을 만족하도록 발전소 절차를 갖추고 있고 이에 더하여 출력이 100%를 넘으면 운전원이 즉시 출력을 100%이하로 낮추도록 하며, 위의 다섯 가지 요건을 위반하면 보고하도록 되어 있다[12].

발전소가 허가된 열출력 범위 내에서 운전하고 있는가에 대한 관심이 국내에서도 종종 제기되어 왔다[13][14]. 특히 Westinghouse형, Framatome형 및 CANDU형 발전소에서 정격 열출력의 100% 이상이 기록된 적이 있어 일반 대중은 허가된 출력범위가 얼마까지인가 하는 의문을 갖거나 혹은 허가된 출력 범위 이상으로 운전하고 있는 것이 아닌가 하는 의혹을 갖는 경우가 있어 왔다. 즉 국내에도 이에 대한 논의가 간헐적으로 있어왔고 규제입장도 제시되어 왔다. 우선 과학기술부는 “보수적인 개념에 입각하여 열출력 값이 100%를 초과하지 않는 것이 바람직하므로 운전시 상기 값을 초과하지 않도록 노심 열출력 실제값 관리, 열출력변화 계속감시 및 교육 등이 포함된 운영방안을 수립 시행할 것”을 정식으로 권고하였다[13]. 아울러 과기부는 한전기공지 [14]에서 “정부에서는 허가된 정격출력 이상은 높이지 못하도록 지도 감독하고 있다”라고 천명한 바도 있다. 아울러 한국원자력안전기술원에서도 정격출력을 넘지 않게 원자로 운전을 하도록 사업자에 이야기해 온 것으로 알고 있다.

그러나 위에 있는 미국의 다섯 가지 요건처럼 구체적으로 어떻게 열출력 값이 100%를 초과하지 않도록 하는지에 대한 요구사항을 공식적으로 밝힌 바는 없다. 최종안전성분석보고서의 사고해석 내용과 미국의 규제 입장을 참조하면 아래와 같은 국

내의 규제 입장을 표명하는 것도 가능하다고 본다: “운전 중 원자로의 평균 열출력은 정격 열출력을 넘지 말아야 하며, 순간 열출력 최고 값은 사고해석에 사용한 사고 시작 시점의 원자로 열출력값에서 열출력의 측정 불확실도를 뺀 값을 넘지 말아야 한다.”

4. 개선 방향

앞에서 이야기한 바와 같이 운전 중 원자로의 열출력 최고 값은 사고해석에서 사용한 사고 시작 시점의 원자로 열출력값을 초과해서는 안된다. 사고해석에서 사용한 사고 시작 시점의 원자로 열출력값은 정격 열출력에 열출력 측정 불확실도 및 약간의 여유도를 더하여 얻어진다. 따라서 열출력 측정 불확실도가 원자로 열출력 제한에 중요한 인자임을 알 수 있다. 실제로 원자로 열출력 측정 불확실도에 가장 큰 기여를 하는 인자는 증기발생기 급수유량측정 불확실도인데, 증기발생기 급수유량은 전통적으로 Venturi를 사용하여 측정되어 오고 있다. 이 Venturi에 Fouling이 생겨서 급수유량을 과다 측정하여 원자로 출력생산 저하를 유발하고 있다는 주장이 제기되어져 왔다. 이에 따라 Venturi 유량계를 대체하고자 하는 노력이 계속되어 온 결과, 최근에는 실제로 적용이 가능한 초음파 유량계가 미국에서 개발되어 인허가 되었다[16][17]. Comanche Peak-1,2 발전소에 최초로 적용하는 Caldon사의 LBFM(Leading Edge FlowMeter)는 “transit time multipath, in-line mounted ultrasonic flow meter”로서 이의 적용으로 1%의 원자로 출력 증가가 가능하다고 보여진다. 이것은 이 초음파 유량계가 증기발생기 급수유량 측정 불확실도를 개선시켜 원자로 열출력 측정능력을 향상시켜주기 때문에 가능한 것이다.

CANDU형 원자로인 월성 3호기에서는 RRS의 증기발생기 열출력을 월1회 TPC 증기발생기 열출력에 교정하고 있다고 2.1절에서 소개한 바 있다. 즉 RRS의 증기발생기 열출력과 TPC 증기발생기 열출력이 0.5% 이상 차이가 나면 0.5% 이내로 RRS의 증기발생기 열출력을 교정할 것을 요구하며, 이때 TPC 값이 “안전제한값” 101% FP를 초과하는지 확인하여 초과시 RRS의 Demand Power를 100% FP에서 초과되는 양만큼 낮추도록 하고 있는 것이다. 그러나 여기서 “안전제한값” 101% FP의 근거가 분명하지 않으므로 매월 교정시 TPC 증기발생기 열출력이 100% FP를 초과하지 않도록 하고 운전 중에 RRS의 증기발생기 열출력이 100%를 넘지 않게 절차화하는 것이 개선 방향이 될 수 있다고 생각된다.

Westinghouse형 원자로의 경우 핵증기공급계통의 1, 2차측 열평형 변수를 1일마다 취득하여 NIS 출력과 Off-line 증기발생기 열출력 의한 출력 차이가 기술지침서에서 요구하는 값인 2%보다 클 때 NIS를 교정하고 있다고 2.2절에서 소개한 바 있다. 그러나 매일 NIS 출력 점검시 열출력이 약0.3%(정확한 값은 2%에서 열출력 측정 불확

실도를 뺀 값임) 이상 차이가 나면 교정하게 하고 Off-line 증기발생기 열출력이 100% FP를 초과하지 않도록 하며, 운전 중에 NIS의 열출력이 100%를 넘지 않게 절차화하는 것이 개선 방향이 될 수 있다고 생각된다.

Framatome형 원자로의 경우 핵증기공급계통의 1, 2차측 열평형 변수를 1일마다 취득하여 NIS 출력과 Computer의 증기발생기 열출력 의한 출력 차이가 기술지침서에서 요구하는 값인 2%보다 클 때 NIS를 교정하고 있다고 2.3절에서 소개한 바 있다. 그러나 매일 NIS 출력 점검시 열출력이 약0.3%(정확한 값은 2%에서 열출력 측정 불확실도를 뺀 값임) 이상 차이가 나면 교정하게 하고 Computer의 증기발생기 열출력이 100% FP를 초과하지 않도록 하며, 운전 중에 NIS의 열출력이 100%를 넘지 않게 절차화하는 것이 개선 방향이 될 수 있다고 생각된다.

국내에서 운전되고 있는 ABB-CE형 원자로의 경우 정격 열출력의 100 퍼센트에 도달하면 COLSS에서 경보를 주기 때문에 통상 정격 열출력의 100 퍼센트 이하로 유지하면서 운전하고 있다고 2.4절에서 소개한 바 있다. COLSS는 핵증기공급계통의 1, 2차측 열평형 변수를 실시간으로 취득하여 신뢰성 있는 열출력 값을 생산하므로 ABB-CE형의 경우 정격 열출력은 높은 신뢰도와 정확도를 가지고 감시되고 있다고 볼 수 있다. 그러나 COLSS에서는 일차측열출력인 BDELTA(F)와 터빈출력인 BTFS(F)를 이차측열출력인 BSCAL값으로 교정한 CBDELTA(F)와 CBTFSP(F) 중 큰 값을 발전소의 출력 준위인 PPF로 결정하도록 되어 있기 때문에 출력을 0.1%정도 작게 생산하고 있다고 판단되어 CBDELTA(F)로서 발전소의 출력 준위를 결정하고자 하는 노력이 시도되고 있다(그림 1 및 2).

5. 결론

원자로 설계, 운전 및 안전에서 원자로 열출력은 기본이 되고 기준이 되는 항목이다. 대부분의 원자로 설계 및 운전은 100%출력인 정격 열출력을 기준으로 하여 이루어진다. 그러나 원자력발전소에서 이 정격 열출력을 어떤 한계로 어떻게 지키며 운전해야하고 그 근거가 무엇인지 명확하게 정리되어 있지 않기 때문에 이에 대한 것들을 정리하였다. 아울러 원자로 열출력 한계와 관련된 지금까지 알려진 규제입장도 정리하여 제시하였고 열출력 한계준수와 관련한 개선 움직임들을 소개하고 바람직한 방향들도 제시하였다. 국내 CANDU형, Westinghouse형, Framatome형 및 ABB-CE형 원자로에서 원자로 열출력 한계를 어떻게 지키며 운전하고 있는지를 소개하였으며, 이들을 비교해 볼 때 On-line 감시계통인 COLSS를 이용하여 원자로 정격 열출력을 넘지 않게 운전하고 있는 ABB-CE형 원자로가 규제관점에서 바람직하게 원자로 열출력 한계는 지키며 운전하고 있음을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

- [1] 월성원자력 2,3,4호기 운영기술지침서
- [2] 월성원자력 2,3,4호기 최종안전성 분석보고서, 15장
- [3] Design Manual, "Shutdown System No. 1, Part1," 86-68200-DM-001, Rev. 4
- [4] 월성2발전소 운영절차서, "원자로열출력 보정," 노심-005, 개정1
- [5] YGN 1,2 Technical Specifications
- [6] YGN 1,2 FSAR, Ch. 15
- [7] UCN 1,2 Technical Specifications
- [8] UCN 1,2 FSAR, Ch. 15
- [9] 울진 3,4호기 운영기술지침서 부록: 운영기술지침서의 기술지침에 관한 세부사항
- [10] UCN 3,4 FSAR, Ch. 15
- [11] NRC Internal Memo(Title: Discussion of Licensed Power Level, 8/22/1980) and Note to T. Novak, et. al.(dated 8/28/80)
- [12] UCN 3,4 TA Memo, "Background Information on COLSS Alarms and monitoring Licensed Power Limit During Power Operation," UCN TA-97-178, 11/3/97
- [13] 과기부 검사권고사항표, "노심열출력 초과운전," 관리번호 90-6-023, 4/6/90
- [14] 이상철, "원자력발전소의 시설용량 초과운전," 한전기공지(11/94)
- [15] TR-TS-UC8-93013, "Functional Design Requirements for a COLSS," 4/93
- [16] USNRC, "Weekly Information Report," for the Week ending January 29, 1999
- [17] SERCH, "HIGHLIGHTS: A Regulatory Review for Nuclear Industry Managers," Vol. 12, No. 13, April 5, 1999

PPFS Trend()

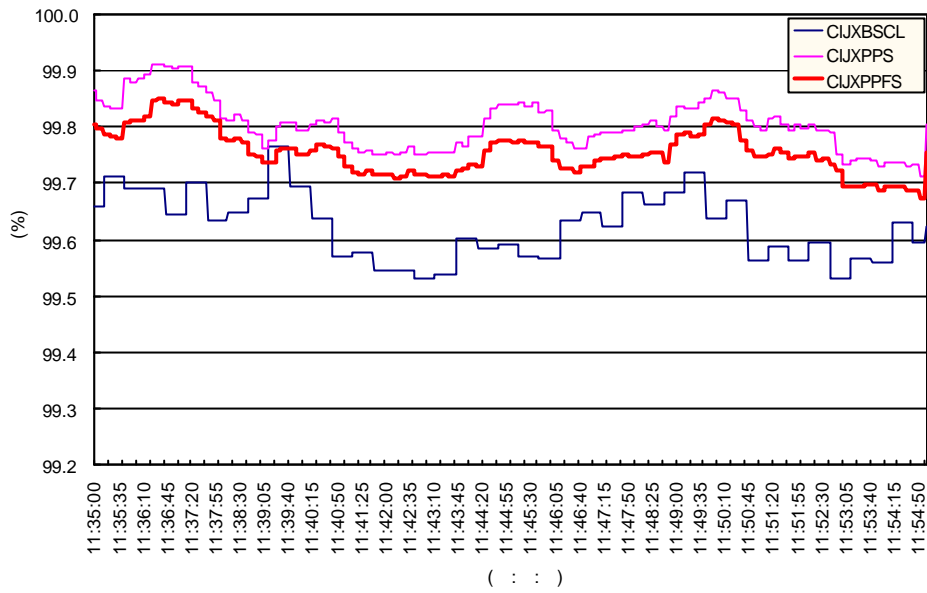


그림 1. 기존 울진3호기 COLSS의 출력 추이

PPFS Trend(CBTFSPF)

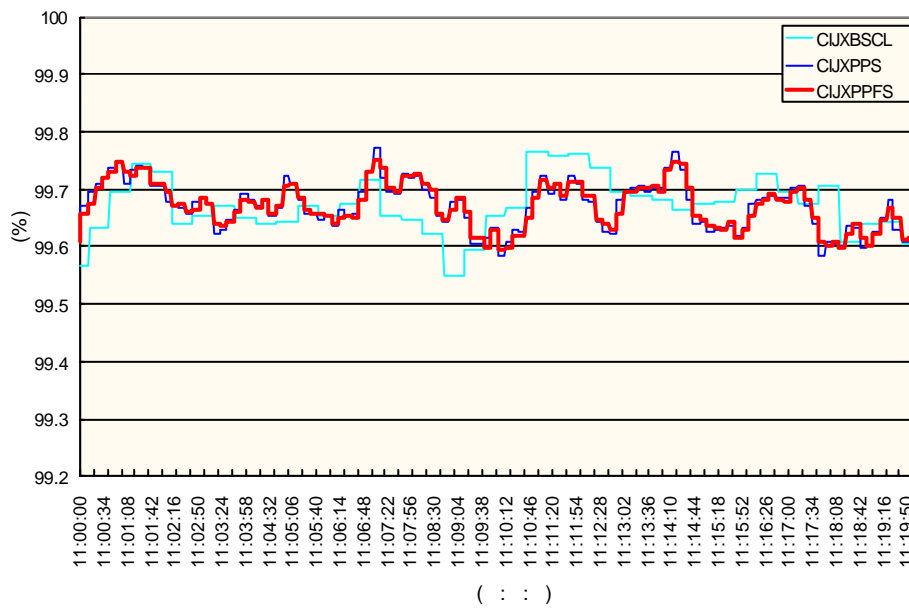


그림 2. CBTFSPF(E)를 제거한 상태에서의 울진3호기 COLSS 출력 추이