

FBR의 실용화와 기술개발

21세기 전반을 목표로 개발중인 고속증식로(FBR)는 안전성을 확보하면서 물량과 경제성에서 경수로와 충분히 경쟁할 수 있는 발전설비가 될 수 있을 것이라는 연구결과가 지나 6월 8일 일본 원자력위원회의 「FBR 개발계획전문부회」에서 보고되었다. 일본원자력발전(주)와 동력로·핵연료개발사업단이 공동 실시한 이 연구 보고서에는 이같은 목표 달성을 위한 앞으로의 기술개발 목표가 구체적으로 제시되고 이를 실현하기 위한 장기적이고 계획적인 연구의 필요성이 지적되고 있다. 여기에서 그 개요를 소개한다.

일본의 고속증식로 개발은 정부의 원자력정책의 중요사항으로 국민협력하에 추진돼 왔다. 고속증식로 기술은 기초·기반적인 연구로 시작돼 20년 이상의 개발로 원형로 「몬주」의 시운전을 실시하기에 이르러 실용화를 바라볼 수 있는 수준에까지 도달했다.

고속증식로를 상업용 발전로로 완성시키기 위해서는 경제성과 함께 안전성, 신뢰성 등을 더욱 높이고 21세기 전반(2020~30년경)의 실용화 시점까지 사회적인 수용성을 높여갈 필요가 있다. 따라서 「몬주」를 잇는 실증로의 건설·운전을 착실히 추진해 기술 경험을 축적하고 실용화를 위한 기술개발과 실증을 해 나갈 필요가 있다.

고속증식로의 실용화를 위해서는 爐의 개발과 병행해 연료사이클(연료 제조, 재처리 등)의 기술개발을 추진해 연료사이클을 포함한 고속증식로 전 체계의 경제성 및 안전성 개념을 모색할 필요가 있다.

21세기 전반에 상업운전이 예상되는 고속증식로의 실용 플랜트를 같은 세대의 경수로를 능가하는 매력

을 지닌 플랜트로 만들기 위해 경제성, 안전성, 신뢰성, 운전성, 유지보수성 등의 개선목표를 설정하고 앞으로의 전망을 명백히 하기 위해 실용 플랜트 개념 개발로 종합적인 대책을 강구하고 이를 구체화하기 위한 기술개발 구상을 마무리지었다.

고속증식로 실용화 목표

같은 세대의 경수로를 능가하는 매력을 지닌 고속증식로의 플랜트를 실현하기 위해 고속증식로가 갖는 장점, 경수로와 비교해서 극복해야 할 문제점 그리고 경수로의 장래동향을 분석, 목표 설정의 착안점을 종합해 이로부터 실용화를 겨냥한 경제성, 안정성 등의 목표를 설정했다. 주요한 개발목표는 다음과 같다.

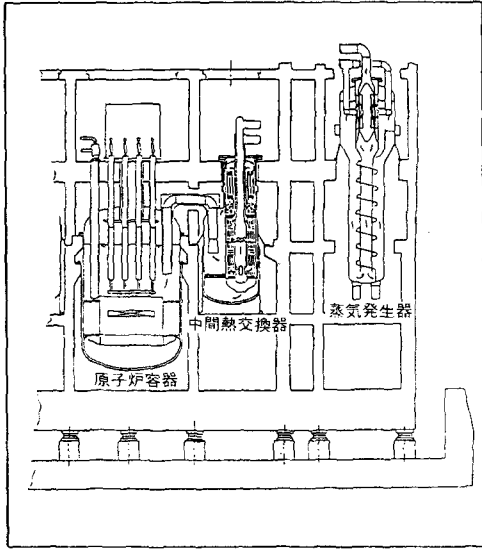
경제성

① 경수로와 비교해 건설비 증가의 주요인이 되고 있는 원자로 구조, 냉각계통 및 연료취급계통에 대해서는 나트륨계통의 특징을 살려 시스템 간소화, 기기 구조의 삭감 및 간소화, 기기 구조의 일체화 등을 목표로 하고 있다.

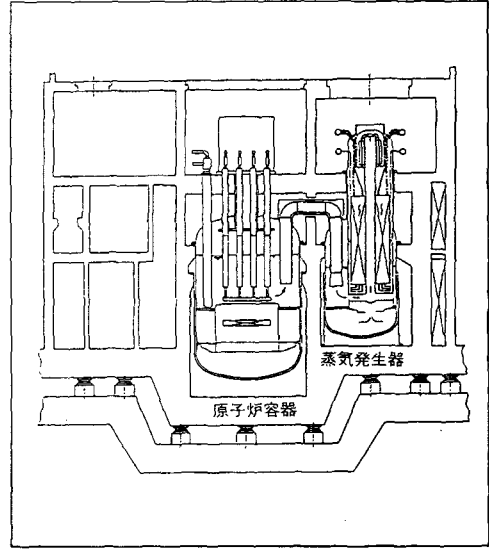
② 고속증식로의 장점을 살려 연료비 등의 발전원가를 낮추기 위해서는 연료의 고연소도화, 플랜트의 고온·고열효율화 등을 목표로 하고 있다.

안전성

많은 기수의 상업용 고속증식로가 운전되는 경우를 상정해 높은 안전성과 일반사회에서 이해하기 쉬운 안



실용로 플랜트 개념도(열교환기/ 순환펌프 一體化=중간열교환기에 1차 순환펌프를 일체화, 증기발생기에 2차 순환펌프를 일체화, 3차원 防震)



실용로 플랜트 개념도(계통 삭제=2차 나트륨계통을 삭제, 증기발생기에 1차 순환펌프를 일체화, 3차원 防震)

전성을 겨냥해 안전성이 높은 노심(노심특성의 개선, 높은 신뢰성을 지닌 안전설비(피동적 기기, 시스템 활용 등)를 목표로 하고 있다.

신뢰성, 운전성, 유지보수성

경수로 등에서 개발 발전시킨 기술을 도입하면서 원형로, 실증로 등의 플랜트 설계, 건설, 운전경험을 반영해 나감으로써 신뢰성, 운전성, 유지보수성의 개선을 모색한다.

이같은 고속증식로의 실용화 목표와 함께 고속증식로가 본래 가지고 있는 특성을 살린다는 관점에서 신형 연료, TRU(초우라늄 원소) 리사이클 등 연료 사이클 전체를 통한 플루토늄 이용 시스템 고도화 목표를 함께 설정해 기술개발을 추진해나갈 필요가 있다.

실용로 플랜트 개념

고속증식로 실용화는 장래전망과 함께 새로운 기술개발, 이들의 플랜트 설계에의 적용 그리고 플랜트에

서의 건설, 운전, 보수 등의 실증 경험을 쌓음으로써 달성된다.

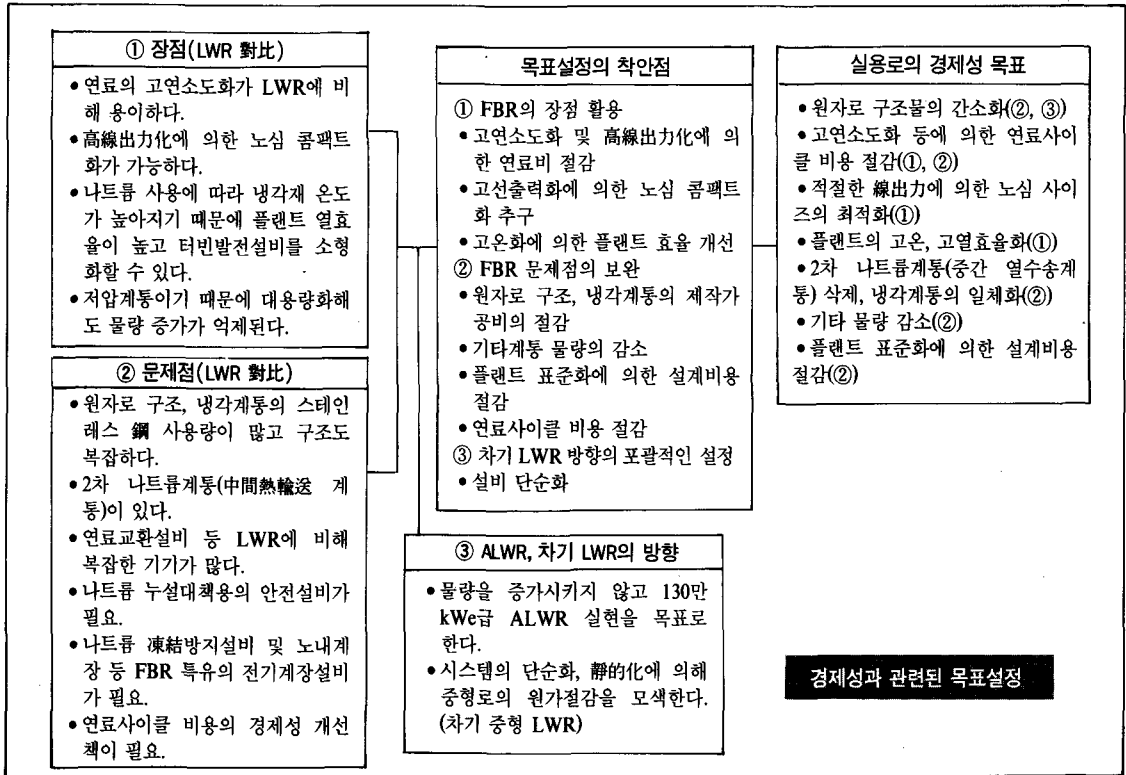
장래전망으로 고속증식 실용로의 경제성과 앞으로의 경제개발 방향을 전망하기 위해 앞서 말한 고속증식로 실용화를 겨냥한 경제성, 안전성 등의 개발 목표를 바탕으로 실용로 플랜트의 개념(5가지 형의 爐)을 개발했다(그림은 2가지 爐의 개념도).

이 실용로 플랜트 개념 개발시에는 다음 사항을 고려했다.

① 출력규모에 대해서는 많은 기수의 고속증식로가 대형 경수로와 경쟁해서 건설되는 실용화 시대를 상정해 경수로와 마찬가지로 경제성에서 우위에 있다고 생각되는 대형로를 플랜트 개념의 대상으로 한다.

경제성은 출력규모에 의존하는 규모효과 외에 건설 기수에 의존하는 표준화 효과, 모듈효과 등에 의해서도 영향을 받는다.

② 연료형태에 대해서는 현 시점까지의 경험, 실적과 기술적인 성숙도가 훨씬 높은 혼합산화물 연료를 대상으로 한다. 질화물 연료나 금속연료 같은 신형 연



료에 대해서는 그 실증이 앞으로의 과제이고 그 혜택 여부는 앞으로의 기술개발 결과에 따라 판단될 것으로 보인다.

③ 노심에 대해서는 많은 기수의 상업용 고속증식로가 건설·운전되는 경우를 상정해 경제성의 영향(노심 특성 개선에 따라 일어나는 노심 지름의 증가 등)은 있다고 해도 일반사회에서 이해하기 쉬운 높은 안전성을 겨냥한 노심을 대상으로 한다.

④ 경제성, 안전성에 대해서는 그 개선에 크게 도움이 될 것으로 기대되는 혁신적 기술을 실용화의 가능성과 기간을 감안해 플랜트 개념에 도입한다. 경제성에 대해서는 지금까지의 평가에서 원자로 및 냉각계통의 물량을 경수로의 약 70% 이하로 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

이들 플랜트 개념 개발에서는 경제성 개선의 포인트로 대용량 浸漬型 電磁펌프 채용 등에 의한 기기一體

化·防震기술 채용에 의한 기기구조의 간소화·표준화, 2차 나트륨 계통(중간열수송계통)의 삭제 등을 들 수 있다.

플랜트 개념을 개발해 그 경제성을 개략 평가한 결과는 다음과 같다.

① 고속증식로가 경수로와 경제적으로 경합하기 위해서는 플랜트 건설원가를 경수로의 약 110%로 억제할 필요가 있는 것으로 보고 있다. 고속증식로 플랜트는 대출력화에 따른 규모의 이점이 크고 또 軋機의 건설원가(FOAK 코스트)에 비해 복수기 도입 후의 건설원가(NOAK 코스트)는 성숙효율 등에 의해 약 20%의 원가절감을 기대할 수 있기 때문에 현재의 실증로 1호기는 130만kW로의 대출력화와 상업적 도입에 의한 성숙효과에 의해 경수로의 약 110%가 될 것으로 평가되고 있다.

② 고속증식로 실용화를 위해 목표를 보다 높게 설

정해 첫 號機에서 경수로와 경합할 수 있는 경제성 달성을 목표로 검토한 결과는 다음과 같다.

첫째, 2차 나트륨계통이 있는 플랜트에서는 앞으로의 기기설계기술 발전에 따라 플랜트 개념 면에서 차이가 난다는 것은 예상할 수 있지만 현 시점에서의 평가에서는 기기 舍體방법을 따른 것이 아니기 때문에 거의 같아 모두 원자로 및 냉각계통의 물량은 경수로의 약 70%, 건설원가는 97~104%가 되었다. 복수기 도입 후의 건설원가는 80% 정도가 될 것으로 전망된다. 이들 실용로 플랜트 개념에는 지금까지 개발돼 실증로 1호기 설계에 도입된 기술 이외에 노심특성 개선, 대용량 浸漬型 電磁펌프에 의한 기기 舍體, 防震, 爐 상부 간소화 등의 새로운 기술을 채용하고 있지만 이들 혁신적 기술에 대해서는 이미 국내외에서 실현을 위한 노력이 시작되고 있어 개발 전망이 밝다. 또한 출력 150만kW로의 대형화에 의한 고속증식로의 규모 이점의 활용, 또는 고속증식로에서 큰 비중을 차지하는 사용후연료 취급설비를 공유하는 트윈 플랜트(Twin Plant) 방식의 채용 등에 의한 건설원가 절감도 생각할 수 있다.

둘째, 2차 나트륨계통을 삭제한 플랜트에서는 원자로 및 냉각계통 물량은 경수로의 약 60%, 건설원가는 90%가 되었다. 복수기 도입 후의 건설원가는 70% 정도로 예상된다.

따라서 3차원 防震과 2차 나트륨계통 삭제 등의 기술을 도입하지 않아도 현시점에서 명확히 개발기간을 예측할 수 있는 혁신적 기술(대용량화와 浸漬型 電磁펌프 채용에 의한 기기 舍體)만으로도 고속증식로의 실용화 목표 달성이 당장에 가능할 것으로 생각된다.

실용로를 겨냥한 기술개발

고속증식로 실용화에 필요한 기술을 실용화 시기까지 개발하기 위해 장기적·계획적 연구개발과 플랜트에서의 실증을 해 나갈 필요가 있다.

다음에 중요한 기술개발에 관해 그 구체적인 목표와 방향을 제시한다.

노 심

일반사회에서 이해하기 쉬운 안전성을 확보하기 위해서는 노심을 보호하는 爐정지계통의 다양화 및 신뢰성 개선 노력과 함께 보다 근본적인 대책인 노심특성 개선에 힘쓸 필요가 있다.

① 팽창, 휨 등의 피동적인 負의 반응도 투입요인을 활용한 노심설계의 개발

② 異常時 準안정상태에 맞는 새로운 노심개념의 창출과 그 구현화

③ 異常時의 노심거동과 관련된 분석·평가기술의 고도화

④ 爐정지계통의 다양화에 의한 爐정지 기능의 신뢰성 향상

붕괴열 제거

붕괴열 제거의 신뢰성은 노심특성 및 爐정지계통의 신뢰성과 함께 원자로의 안전성 개선에 크게 기여한다. 고속증식로는 냉각재인 나트륨 비등점이 높아 低壓설계가 가능하다는 것, 운전온도가 높아 최종 히트싱크(Heat Sink)로서 대기로의 방열이 가능하다는 것, 밀도차에 의한 순환 등의 자연물리현상의 이용이 용이하다는 것 등 신뢰성이 높은 붕괴열제거계통을 실현시키는 데 여러가지 이점을 갖고 있다.

기술개발에서는 이들 이점을 살려 계통의 간소화와 다양화에 의한 신뢰성 향상이 목표가 된다.

① 자연순환 등 자연물리현상의 분석평가법 개발

② 자연물리현상을 이용한 시스템 설계, 플랜트 설계기술의 개발

③ 피동적, 靜的 기기 및 제어방법의 개발

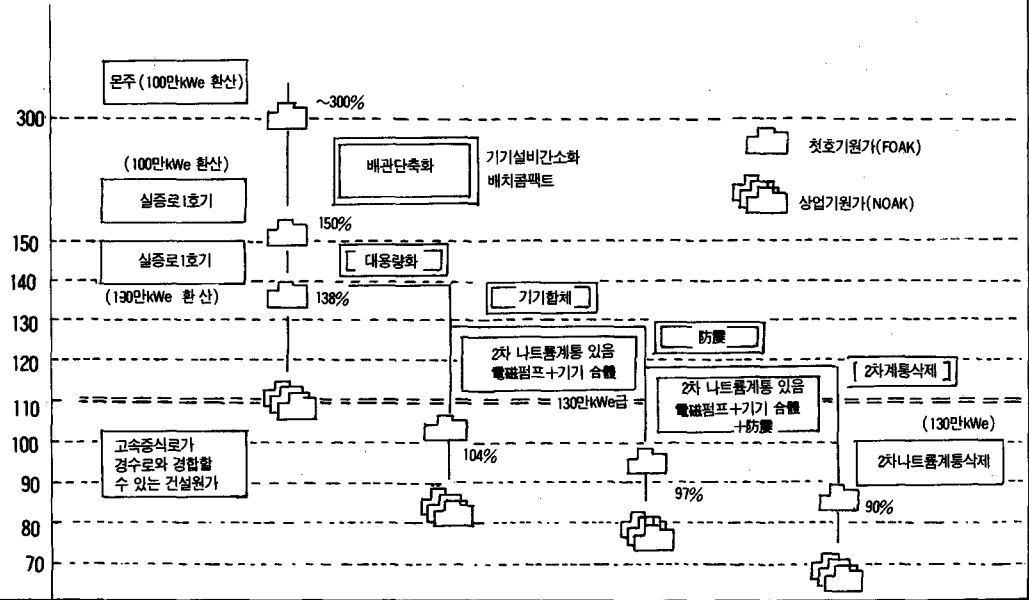
기기의 一體/舍體 및 간소화

플랜트 건설원가에서 큰 비중을 차지하는 원자로 및 냉각계통 기기의 일체 합체화 및 간소화에 의해 보다 높은 경제성 향상을 기대할 수 있다.

① 전자펌프 개발과 냉각기기의 일체화 및 합체화

電磁펌프는 회전부분 등 가동부품이 없어 높은 신뢰성을 얻을 수 있다는 것, 배치 신축성이 높아 냉각계

건설원가 추이(단위: 백만원)



통 기기에 內裝하기가 쉽다는 것 등 순환펌프, 열교환기의 일체·합체화를 하는 데 여러가지 이점을 갖고 있다.

기술개발에서는 이들 이점을 살려 신뢰성을 향상시키면서 합리적인 냉각기기의 일체·합체화를 실현해 경제성을 향상시키는 것이 목표가 된다.

- 대용량 浸漬型 電磁펌프 개발
- 대용량 냉각계통 일체·합체 기기의 신뢰성 실증

② 爐上部 구조/ 연료교환설비의 간소화

냉각재에 나트륨을 사용하는 고속증식로에서는 원자로 용기를 개방하지 않고 연료교환을 할 필요가 있어 회전 플러그(Plug)를 가진 복잡한 구조로 돼 있기 때문에 爐상부구조를 간소화함으로써 경제성이 향상된다. 爐상부구조가 제어구동기구를 지지하고 있기 때문에 높은 剛性이 필요하므로 防震기술과 함께 爐상부구조의 근본적인 간소화에 의한 효과가 크다.

爐상부구조의 간소화 방법으로는 회전 플러그를 없애고 노심 상부 구조물을 상하로 이동시켜 연료교환을 하는 등 여러가지 방법을 생각할 수 있지만 가장 경제성이 높은 伸縮昇降方式의 爐상부구조를 목표로 한다.

· 伸縮昇降方式 爐상부구조의 개발

연료

연료개발에서는 발전원가의 절감, 안전 여유도의 증가 또는 노심의 콤팩트화를 달성하기 위해 연료의 고도화를 목표로 한다.

- 고온 크립(Creep) 강도, 耐스웰링(Swelling)성이 높은 피복관 재료 개발
- 中空연료 개발

2차 나트륨(中間熱輸送) 계통 삭제

고속증식로의 경제성 향상을 위해서는 앞서 말한 일체화, 간소화가 효과적인 수단이지만 보다 근본적인 대책으로는 나트륨을 냉각재로 사용함에 따라 설치되는 고속증식로 특유의 계통인 2차 나트륨(中間熱輸送) 계통을 삭제한 시스템을 생각할 수 있다.

2차 나트륨계통 삭제를 실현하기 위해서는 高신뢰성 2重管 증기발생기 및 파손검출 시스템에 의해 나트륨과 물 반응사고를 방지하고, 이와 함께 2중관의 내·외관 동시파손을 상정하지 않는 논리와 데이터를 정비

하는 한편, 가상적인 貫通漏泄에 대해서도 이에 대응할 수 있도록 누설검출기술과 사고방지 시스템 및 안전평가기술을 개발할 필요가 있다.

- 고신뢰성 2중관 증기발생기 개발과 신뢰성 실증
- 卽應性, 신뢰성을 갖춘 파손검출 시스템의 개발
- 나트륨과 물 반응사고 방지기술과 평가기술 개발

防 震

방진설계를 채택함으로써 耐震설계에 비해 원자로 구조 및 냉각계통 기기의 경량화·간소화 및 플랜트 설계의 표준화가 가능해져 경제성에 크게 기여한다. 현시점에서 수평방진기술의 전망은 밝아지고 있지만 고속증식로의 실용화를 위해서는 3차원 방진기술 개발이 요망된다.

기술개발에서는 방진요소 등의 기기개발과 함께 방진의 기준화가 목표가 된다.

- 수평방진기술 확립과 3차원 방진기술의 개발
- 방진설계기준의 확립

나트륨중의 구조물 기기의 검사 보수기술

고속 증식로에서는 원자로계통의 구조물, 기기를 검사 또는 보수할 때 고온, 불투명, 活性의 나트륨을 사용하고 있기 때문에 나트륨중의 구조물 기기의 검사, 보수가 경수로에 비해 어렵다는 문제가 있다.

고속증식로의 신뢰성과 플랜트 가동률 향상이란 관점에서 더욱 더 고도화를 모색해 나갈 필요가 있다.

고도화, 다양화

① 신형 연료

질화물연료, 금속연료 등의 신형연료에 대해서는 경제성, 안전성 등의 측면에서 앞으로 산화물연료를 능가할 가능성이 있어 그 타당성 검토와 照射실적의 축적을 적극적으로 추진할 필요가 있다. 또한 연료제조·재처리기술에서는 질화물연료가 현행의 혼합산화물 연료 기술의 연장선상에 있기 때문에 이의 실용화가 용이할 것으로 생각된다.

② 중형로와 소형로

적절한 출력규모의 노심을 채용함으로써 노심의 피동적 안전특성, 붕괴열 제거의 신뢰성을 쉽게 확보할 가능성이 있다.

상업용 대형발전로의 기술개발과 병행해서 중형로와 소형로의 개발동향을 파악 검토하고 장래의 다양한 요구에 부응할 수 있도록 기초를 쌓아나간다.

- 중형/소형로 노심의 특성에 관한 검토
- 중형/소형 플랜트의 안전성에 관한 검토
- 중형/소형 플랜트 개념에 관한 검토

③ 연료사이클

고속증식로의 연료사이클과 관련된 기술개발에서는 기술적인 성숙도가 특히 높은 혼합산화물연료의 제조·가공 및 재처리기술의 고도화, 실용화가 모색되고 있다. 또 연료사이클 전체 시스템으로서의 고도화·調和를 모색한다는 관점에서 TRU 연료기술 등 TRU 리사이클 기술개발이 추진되고 있다.

따라서 노심, 연료의 개발은 이를 연료사이클의 기술개발 동향과 보조 맞추어 추진해나갈 필요가 있다.

맺 음 말

21세기 전반으로 예상되고 있는 고속증식로 실용화 시점까지 고속증식로가 경수로와 경합해 주요발전설비가 될 수 있는 가능성과 방향이 제시되었다.

고속증식로 실용화를 위해서는 원형로에 이어 실증로의 건설·운전을 통해 고속증식로 기술의 발전·정착화를 추진하는 동시에 노심특성의 개선, 신뢰성이 높은 붕괴열 제거계통 등의 안전설비, 대용량 浸漬型 電磁펌프 등에 의한 기기 舍體, 고성능 연료, 2차 나트륨계통 삭제, 防震 등의 기술개발을 위한 장기적이고 계획적인 연구가 필요하다.

따라서 앞으로도 정부의 종합적인 개발추진계획하에 官民이 각각의 역할에 따라 협조적이고 효율적으로 기술개발을 추진해 나갈 수 있도록 협조체제를 유지하는 것이 중요하며 이같은 노력을 앞으로도 지속해 나가는 것이 긴요하다고 본다.

〈日本 原子力産業新聞 6月17日/24日字〉