



# RT의 첨단 산업 이용 현황 및 전망

## 박 경 배

한국원자력연구소 하나로이용연구단장

### 개 요

국내에서는 한국원자력연구소를 중심으로 1960년대부터 방사성 동위원소 및 방사선 이용을 추진해 왔으며 1992년부터 원자력 증강기 개발 계획에 방사선 및 방사성 동위원소 이용 분야에서 괄목할 만한 연구 성과를 얻고 있다. 방사성 동위원소 및 방사선은 의료·공업·농업·식품·환경·생명공학 등 다양하고 광범위한 분야에서 이용되어 국가 경쟁력 제고와 삶의 질 향상에 기여하고 있다. 그러나 방사성 동위원소 및 방사선 이용 분야는 원자력 발전 분야에 비하여 상대적으로 낙후되어 원자력 산업에서 차지하는 비중도 10% 정도로 미미한 데 비하여 선진국인 미국이나 일본의 경우 60~80%를 차지하고 후발 주자들인 말레이시아나 동남아권의 국가들도 50%를 웃돈다.

우리 나라 방사성 동위원소(RI)/

방사선 이용 관련 개발은 제234차 원자력위원회(1994.7.)에서 2030년을 향한 원자력 장기 정책 방향에서 확정된 「방사선 및 방사성 동위원소 이용 진흥 종합 계획」을 원자력법에 반영하여 1995년 1월부터 「원자력종합진흥계획」 따라 1997년에 수립된 1차 「방사선 및 방사성 동위원소 이용 진흥 종합 계획」을 수행하였으며, 현재는 2002년에 수립한 2차 「방사선 및 방사성 동위원소 이용 진흥 종합 계획」을 수립하여 수행하고 있다.

2차 계획 수립 과정에서 정부는 원자력 분야의 연구 환경 변화와 세계적인 흐름에 맞추어 원자력 분야의 균형 발전을 도모하고자 방사성 동위원소 및 방사선 이용에 대한 국가 장기 정책을 확고히 정립하고 이 분야의 활성화와 발전을 이루기 위하여 2010년까지 원자력산업에서 차지하는 비율을 30%로 확대하기로 하였다. 그 일환으로 원자력 진

흥 및 RT 분야의 이용 확대를 원활히 추진하기 위한 「방사성 동위원소 이용 진흥법」이 2002년 12월 26일 공포되었다.

2003년 6월에는 방사선 기술(RT: Radiation Technology)을 의료 공업 환경 생물 자원 우주 항공 등에 활용하여 첨단 기술을 개발하기 위한 첨단방사선이용연구센터의 기공식이 거행되어 가시적인 성과를 내기 시작하고 있다.

본고에서는 현재 원자력학회 주관으로 추진되고 있는 원자력기술지도(NuTRM)에 나타난 RT관련 추진현황 및 내용을 소개하고 RT 중에서도 첨단 산업과 관련된 분야를 대표적인 실체를 중심으로 그 현황 및 전망에 대하여 기술하였다.

### 국가 원자력 지도 작성

#### 1. 필요성 및 목적

국가 기술 지도는 미래 수요를 만

축하는 핵심 기술/제품을 개발하기 위한 국가 차원의 전략 계획 문서로서, 국가 차원에서 해당 기술의 기술 경제적 또는 전략적 가치를 장기적으로 평가하고, 이러한 미래 가치 창출을 제고하기 위한 국가 연구 개발 사업 투자 평가 및 관리에 매우 효율적인 수단으로 인정되고 있다.

원자력 분야의 경우, 원자력 연구 개발 사업은 과기부에서 원자력 진흥 종합 계획의 부문별 시행 계획에 따라 10년간의 원자력 연구 개발 사업 계획과 연도별 시행 계획을 수립하여 추진하고 있고, 산업자원부는 「원전 기술 고도화 계획(1999~2006)」(2개 분야 27개 대과제)을 수립하고 이에 따라 주로 원자력 발전 기술을 경제적인 측면과 안전성 측면에서 제고하는 연구 개발을 수행하고 있다.

현재는 제2차 원자력 진흥 종합 계획하에 원자력 연구 개발 중장기 계획과 원전 기술 고도화 계획이 추진되고 있으나, 기술 개발 계획이 공급 측면의 기술 주도적으로 구성되어 있으므로 원자력 진흥 종합 계획의 미래 가치 실현을 보다 구체적으로 반영한 미래 수요 지향 관점의 원자력 기술 지도 개발이 필요하다.

국가 원자력 지도 작성 목적은 원자력 기술과 관련된 미래 경제 사회 발전과 기술 변화를 예측 전망하고, 국가 원자력 연구 개발의 장기 비전의 전략적 달성 경로를 관리하기 위

한 원자력 기술 지도를 효율적으로 작성 운영하는 합리적인 추진 방안을 제시하는 것이다.

## 2. 추진 내용

원자력 기술 지도 작성 단계 중 용역 기간과 비용을 고려하여 1단계 범위인 대형 국가 기술 개발 투자 관리를 위한 기술 지도의 성격 및 용도를 규명하고 기술 지도 작성 방법 및 절차를 분석하고 기술 지도 기법을 국가 원자력 개발에 대한 적용하기 위한 방안을 검토하였다.

원자력 기술 지도 작성 기본 방향 및 범위를 설정하기 위해서 국내외 기술 지도 작성 기법 및 사례를 검토하고 원자력 연구 개발 및 기술 혁신의 기술적·경제적·사회적 특성을 분석하였다.

그리고 미래 수요 지향 관점에서 국내외 원자력 기술 개발 현황 및 장기 계획(한국·미국·일본·프랑스 등)을 분석한 다음에 첫 번째 단계로 국가 원자력 기술 활용의 비전 설정, 목표 및 시나리오 결정, 전략 제품 및 첨단 기술 결정, 주요 핵심 기술을 선정하였다. 첫 번째 단계의 미비점을 보완하고 국가 원자력 기술지도 작성을 완성하기 위한 방안을 포함한 2단계 계획도 제안하였다.

## 3. 향후 추진 계획

앞으로 국가 원자력 기술 지도의

작성을 완수하기 위해서는 수행한 1단계 작업을 토대로 누락되었던 전략 제품의 포트폴리오와 전략 환경(Strength Weakness Opportunity Threat, SWOT)을 분석하여 전략 제품의 기술 사회 경제적 가치를 2단계에서 평가하게 된다.

그 다음에 주력 핵심 기술의 정의, 영역, 수요자 조사, 세부 핵심 기술의 기술 지도 작성, 기술 개발 전략, 실천 계획(Action Plan)을 수립하고 원자력 기술 지도 작성, 사후 관리 및 개선을 포함하는 전반적인 기술 지도 개발 및 운영 과정과 추진 방안도 제시한다.

원자력 기술 지도 작성 및 운영 단계의 세부 과정 규명과 과정별 실행 방법론을 정립하고 단계별/과정별 추진 조직 및 절차를 수립하고, 국가 원자력 기술 지도 운영을 위한 세부 추진 방안을 제시하여야 한다.

그리고 원자력 중장기 연구 과제와 산자부 전력 기금 사업 연구 과제와의 연계 및 원자력위원회의 역할에 대한 연급이 필요하다.

연구 방법론 측면에서는 연구 내용의 타당성 및 신뢰성 제고를 위하여 과학 기술 전문가뿐만 아니라 관련 경영·경제·사회학 전문가를 활용해야 한다. 구체적으로 말하면 주요 주제/사례별 외부 전문가 초청 세미나 또는 워크숍을 최하여 연구 결과를 보완하고 주요 단계별 과제 성과 발표 회의를 개최하여 연구



내용 및 결과에 대한 과학적 합리성을 보완해야 할 것이다.

**국가 원자력기술지도에 반영된 RT 내용**

원자력 에너지는 기술의 특성상 열 발생과 방사선 발생의 두 가지 측면에서 이용 개발이 전제되어 추진되어 왔다.

방사선 발생에 따른 원자력 이용은 지난 50년 동안 열이용 분야에 비하여 비교적 제한된 분야에서 산업화가 진행되어왔다. 즉 방사선 분야의 경우 핵분열 에너지 생산에서 기본 자료 확보 등 기초 연구 수준에서 자료의 축적이 이루어져 왔으며 이 과정에서 일부 기술 분야 즉 방사선 비파괴 검사, 방사선 핵의학 및 방사성 동위원소의 이용과 응용, 방사선 발생 장치의 산업적 이용 등에서 진전이 있었다.

방사선과 방사성 동위원소의 경우 지금까지 산업화 또는 실용화가 진행중인 방사선 외에 새로이 시장 수요에 맞는 방사선과 방사성 동위원소의 개발이 이루어졌거나 기존의 축적된 정보와 기술을 실용화하면 수요가 증가될 것으로 전망되고 있다.

특히 방사선과 방사성 동위원소의 경우 21세기 신과학 기술 산업으로 등장하고 있는 생명 공학 산업, 나노 기술 산업, 우주 기술, 환

경 분야 등 활용의 다양화가 급속하게 진행될 것으로 전망되며, 이를 위한 다양하고 성능이 혁신적으로 개선된 입자 가속기 개발과 투자 및 새로운 형태의 기술 산업화가 진행될 것으로 전망되고 있다.

국가 원자력 기술 활용의 5개의 비전이 제시되고 RT 분야는 4개 분야에 반영되어 있다.

1. 미래 청정 에너지로서 원자력 비전(A1-6)

2. 국민의 삶의 질 향상을 위한 원자력 비전(B1-2)

B1 의/식/주의 안정화 및 선진화

B2 건강한 인류 사회 구현

3. 국가 산업 발전 및 위상 제고를 위한 원자력 비전(C1-3)

C1 산업 기술 고도화 및 제품 고급화

4. 인류 지적 자산 형성의 원천 기술로서 원자력 비전(D1-9)

D8 산업 및 의료용 동위원소의 원활한 생산 및 공급

5. 미래 유망 기술로서의 원자력 비전(E1-10)

E5 방사선 의학 기술

E6 RI 및 방사선 이용 기술

국가 원자력 지도에 포함된 RT 관련 추진 내용은 아래와 같은 방향과 목표로 설정되어 있다.

1. 의/식/주의 안정화 및 선진화 (B1)

1) 식량의 안정적 생산과 확보

(B11)

2) 식품 생명 자원의 활용 극대화 (B12)

3) 방사선 계측 및 방사선 영향 평가와 대응 (B13)

4) 방사선을 이용한 환경 보전 (B14)

2. 건강한 인류 사회의 구현 (B2)

1) 방사선을 이용한 질병의 조기 진단 (B21)

2) 방사선을 이용한 질병의 효율적 치료 (B22)

3) 방사선의 생체 영향 평가 (B23)

4) 방사선 의료 장비 개발 (B24)

3. 산업 기술 고도화 및 제품 고급화 (C1)

1) RT를 이용한 산업 시설의 진단 및 최적화(C11)

2) RT 이용 소재 개발(C12)

3) 방사선 발생 장치 개발(C13)

4. 산업 및 의료용 동위원소의 원활한 생산 및 공급 (D8)

1) 의료용 및 산업용 동위원소의 생산 및 원활한 공급 (D81)

5. 방사선 의학 기술(E5)

6. RI 및 방사선 이용 기술(E6)

3. RT의 산업적 이용현황

**RT의 산업적 이용 현황**

1. NTD(Neutron Transmutation Doping)

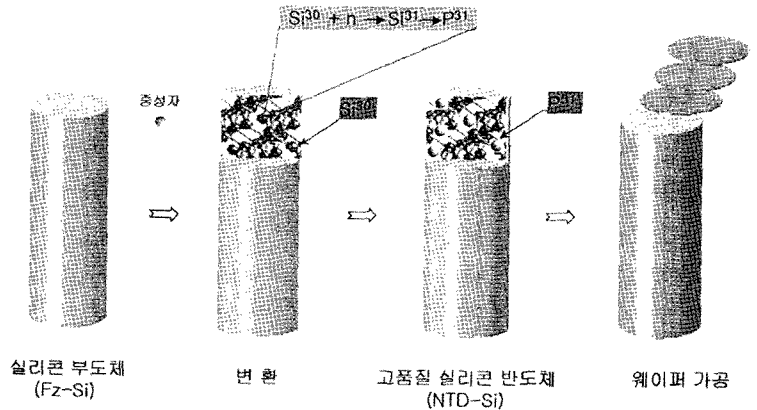
중성자 핵변환 도핑 기술

(Neutron Transmutation Doping)은 방사선을 산업적으로 이용하는 분야 중의 하나로써 전기가 흐르지 않는 '부도체 실리콘'에 중성자를 쬐어 '반도체 실리콘'으로 변환시키는 기술이다. 국내에서는 2002년 연말 연구용 원자로인 하나로에서 처음 개발하여 반도체 실리콘 생산을 시작하였다.

이 반도체는 전력용 실리콘 반도체 소자 가운데 고급 제품에 주로 이용되는데, 특히 전력을 제어하는 Power Device인 PCT(Phase Control Thyristor), GTO(Gate Turn Off Thyristor), IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 등에 주로 사용하며, 초저온의 온도 측정에 사용하기 위하여 게르마늄에 적용하는 경우도 있다.

현대 문명의 총아인 반도체는 컴퓨터에만 쓰이는 것이 아니고 전력을 안전하고 편리하게 사용할 수 있도록 하며 온도계 등의 센서로도 쓰인다. 미래의 컴퓨터는 반도체에서 탈피할 것으로 예상되지만, 전력 조절에 사용하는 반도체를 대체하는 기술은 아직 예견되지 않고 있다.

공해 문제를 완화하기 위하여 전기 자동차, 고속 전철, 자기 부상 열차 등 전기를 사용하는 운송 수단이 늘고, 전기를 더욱 안전하고 효율적으로 사용하는 기술이 계속 개발될 것이다. 이에 따라 반도체의



〈그림 1〉 중성자 도핑 개념

수요는 증가하고, 더 크고 품질도 좋은 반도체를 만들기 위한 경쟁이 예상된다.

스피커에 사용되는 앰프는 소리에 따라 전기의 세기를 조절하여 스피커에서 노래가 흘러나오게 한다. 앰프의 핵심은 트랜지스터이며 이 트랜지스터는 반도체로 만든다.

선풍기 바람이 저절로 강해졌다 약해졌다 하면서 시원한 바람을 내고, 철강을 만드는 제강 공장의 전기로, 공장의 큰 기계를 구동하기 위한 대형 모터, 고속 전철이 달리는 등 전기 흐름을 조절하는 곳에는 반도체가 있다. 전기 자동차에 전기를 충전할 때와 저장된 전기를 써서 자동차가 달릴 때 반도체가 조절해 준다.

해저 케이블로 섬에 전기를 보낼 때는 노이즈가 작고 송전 손실을 줄이기 위해 직류로 보낸다. 따라서

교류를 직류로 만들어 보내고 섬에서는 다시 교류로 만들어서 쓴다. 이와 같이 큰 전력을 교류에서 직류로, 직류에서 교류로 바꿀 때도 반도체를 쓴다.

전기가 많이 흐르면 반도체 내부에서 스파크가 생기고 타버릴 수 있다. 이를 방지하려면 저항이 낮은 질 좋은 반도체를 사용하여야 하는데, 전기가 많이 흐를수록 더욱 질이 좋은 것을 사용해야 한다.

반도체의 질은 실리콘 단결정의 품질과 이 단결정이 반도체의 성질을 갖게 하기 위해 가미되는 극미량의 불순물 분포가 결정한다. 따라서 대전력용 반도체 재료인 고순도 실리콘 단결정은 석영 도가니에서 만들어지는 저전력용 실리콘과는 달리 고주파 가열기를 이용하여 만들어지고, 원자로에서 중성자를 고르게 쬐어 불순물의 균일 분포를 얻게



되는 것이다.

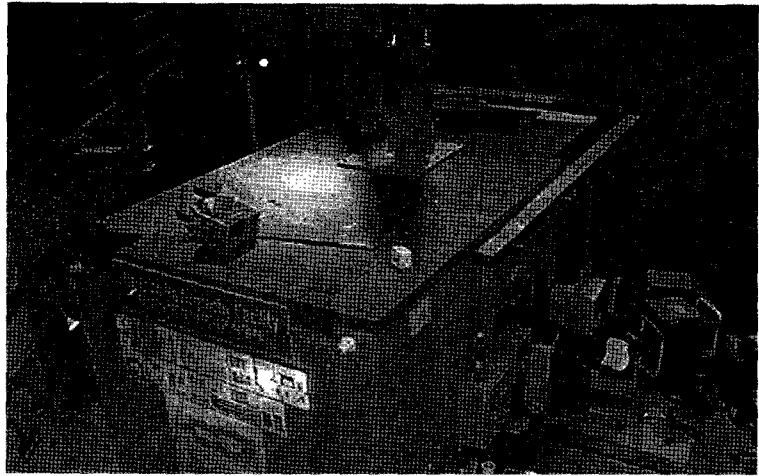
이와 같이 NTD 반도체는 전력용으로 사용되는 것 외에도 일부이긴 하지만 방사선 검출기, 레이저 탐색기의 센서 등 군수용과 같은 특수 분야에도 이용되고 있다.

## 2. 중성자 래디오그래피 (Neutron Radiography)

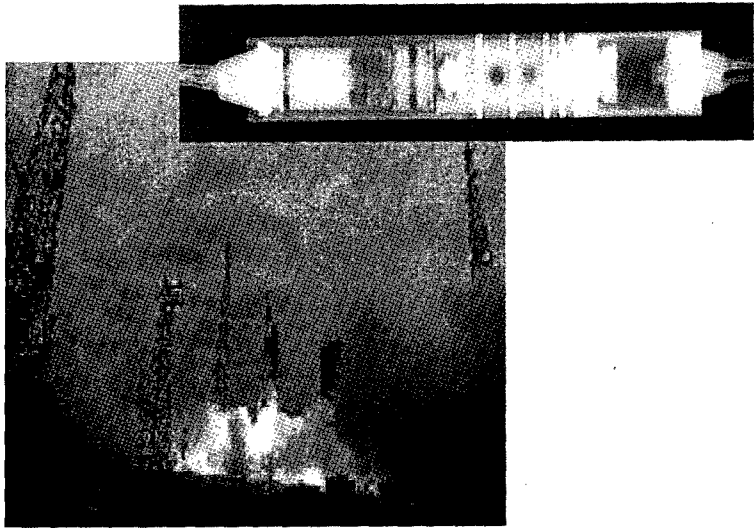
중성자 투과 비파괴 검사 장치는 원자로형, 가속기형, 방사선동위원소형으로 구분된다. 원자로형 검사 장치는 1985년도에 TRIGAMARK-III에서부터 이용되기 시작하여 1997년에 연구용 원자로 하나로 개발 및 설치되어(그림 2) 핵연료, 항공기 부품, 우주 발사체 등의 미세 결함 등을 탐지하고, 국가 기간 산업인 반도체 실리콘, 자동차 강판, 엔진 및 부품 개발을 위한 비파괴 분석 및 검사 등에 주로 사용되어 왔다.

하나로에 설치된 장치는 열중성자속이  $5 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup> sec 이며 집속비(L/D)가 270이다. 표준 규격 ASTM-545-91에 기준하여 본 장치가 1등급 판정을 받아 홀형은 250 $\mu$ m, 간극형은 13 $\mu$ m 정도에 분해능을 갖는다. 한 번 검사할 수 시료의 크기는 30 $\times$ 45cm<sup>2</sup>이며 필름을 사용한 경우 중성자 fluence는 109 n/cm<sup>2</sup> 정도가 요구되고 있다.

중성자 투과 비파괴 검사란 중성자를 이용한 방사선 투과법으로써



〈그림 2〉 1997년도에 개발된 하나로 중성자 투과 비파괴 검사 장치



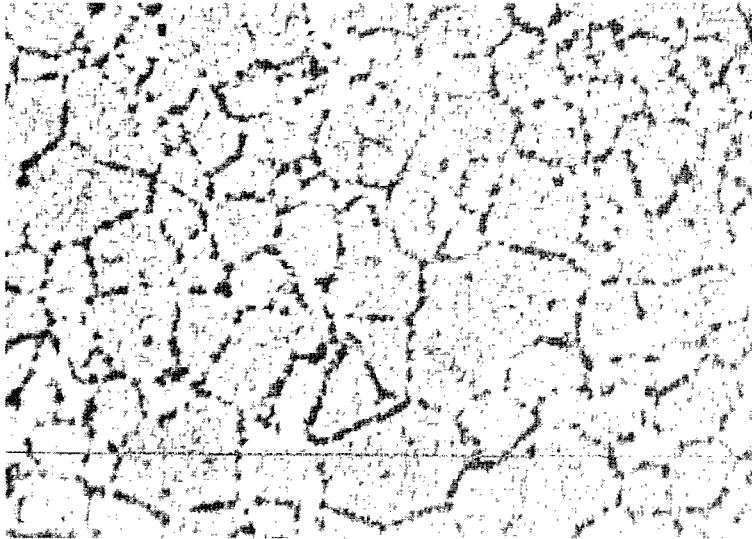
〈그림 3〉 중성자 투과 비파괴 검사 장치를 이용한 우주 발사체 검사

검사품을 투과한 중성자선을 Gd 전환막(Converter)의 반응으로 방출되는 2차 방사선  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 를 사진 필름, 섬광체와 카메라에 노출하여 영상화하는 기법을 말하는데 보통 X-ray 검사법과 방법은 동일하다.

특히 중성자선은 수소·탄소·질소·산소 등의 화합물에 따라서 투과도의 차이를 보여 화합물 분석에

매우 적절하게 이용되고 있어 인공 위성 발사체의 내부 충전과 미사일 폭지관 간극 측정에 활용되고 있다(그림 3).

그 외는 중성자가 원자핵과 반응하여 방출되는  $\alpha$ ,  $\beta$  방사선을 고체 검출막 노출하여 이용하는 autoradiography 방법 등이 있다. 특히 포항제철에서 세계 시장을



(그림 4) 중성자 투과 비파괴 검사 장치를 이용한 자동차 강판 보론 분석

겨냥하여 생산하는 자동차 강판의 부식성을 개선하고 단단한 특성(경화성) 증가하기 위하여 보론합금강을 개발하는데 autoradiography 방법을 이용한다(그림 4).

### 3. 방사성 추적자 이용 기술

#### 가. 국내 현황

우리 나라에서는 원자력연구소에서 1960년대 후반부터 1970년대 초반까지 방사성 추적자 기술에 관한 기초 연구를 하였다. 저수지 누수 탐사, 항만의 해사 이동 탐사, 비료 공장 원료 혼합도 측정 등과 같은 몇 가지 사례를 남겼다. 그러나 이 당시에는 전문 연구팀이 구성되지 못하였고 단순히 기초 조사 수준에 머물렀다.

그 후 1970년대 후반부터는 추적자 기술 연구가 단절되었고 1980년대 후반에 이르러서야 UNDP/IAEA/RCA 사업의 영향으로

National Tracer Group이 구성되고 몇 가지 이용 사례를 남기기는 했으나, 본격적으로 연구를 시작한 것은 1997년 이후 원자력 중장기 연구 과제를 수행하면서부터이다.

수년간의 연구를 통해 단기간 내에 우리나라의 방사성 추적자 기술이 괄목할만하게 발전되었다. 국내의 석유 화학·자동차·환경 산업 등에 여러 가지 추적자 기술을 적용하였으며, RTD 분석과 같은 기반 기술과 Flow Rig, 증류탑 자동 검사 장비, 다중 계수 처리 시스템, 추적자 주입기 등 각종 장비들을 비롯하여 software를 개발하여 석유 화학 플랜트 및 환경 처리 시설의 진단을 위한 시범 실험에 활용하였고, 이 중 일부의 기술과 장비를 아시아·태평양 지역 RCA 회원국에 제공하거나 수출하였다.

또한 전산 유체 역학 수치 모델의 검증에 위한 추적자 기술의 개발을

IAEA의 국제 협력 과제를 통하여 추진하고 있고, IAEA 훈련생을 수용하기도 하는 등 아·태 지역 추적자 기술 연구 센터로 발전하기 위해 역량을 키워가고 있다.

그러나 역사가 짧고, 연구 인력도 극소수에 불과하여 기술의 산업계 기술 전파가 어렵고, 새로운 산업적 이용 기술은 물론 공공사업 성격의 중요한 환경 평가를 위한 추적자 기술은 기반 기술과 장비의 개발의 단계에 있다.

#### 나. 국외 현황

방사성 추적자의 산업적 이용을 위한 기본 기술과 주요 이론은 이미 개발되어 일부는 상용화 서비스 단계에 있다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 고속 데이터 처리 및 결과 분석 방법 등을 통해 기술의 한계를 확대하고 있는 추세에 있다.

추적자 실험 결과의 해석을 위하여 전산 유체 역학(CFD)을 활용하는 기법에 대하여 활발히 연구하고 있으며, 환경 시스템의 컴퓨터 모델 실증을 위한 추적자의 이용 연구도 활발히 진행되고 있다. 수자원의 보호 및 개발 분야에도 추적자를 이용하기 위한 연구가 이루어지고 있다.

공업적으로는 유속 측정과 증류탑 검사 기술이 가장 많이 활용되고 있으며, 이 기술들을 전문으로 하는 용역 서비스 업체들이 주요 석유 화학 업체 산하에서 활동중이다.

다음으로 산업 현장에서 많이 사



용되는 기술은 누설 탐사 기술, 유로 막힘 탐사 기술, 체재 시간 분포 측정 기술, 부피 측정 기술 등이다.

석유 화학의 반응 공정 내에서의 혼합도, 마모/부식 측정 기술, 산업용 CT 등은 원자력 연구 기관이 산업계를 지원하는 차원에서의 연구로 수행되고 있다. 선진국에서는 환경 분야 추적자 기술이 일찍부터 활용되어 왔으며, 근래에 환경 문제에 관심이 높아지면서 이 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다.

다. 산업적 이용

① 밀봉 감마선원을 이용한 가동 중 증류탑 진단 실험

Crude oil distillation column은 원유를 분리 정제하는 증류탑으로 나프타·휘발유·경유·중유 등을 생산한다. 이 탑의 중간 부분에 tray가 손상된 것으로 의심되는 이상 징후가 나타나 가동중에 방사선으로 내부의 밀도 분포를 측정하여 tray의 이상 유무를 진단하여 수리를 위한 system shutdown에 앞서 재료 구매 등 보수 계획의 수립을 위한 정보를 제공하였다.

진단 결과 일부 영역에서 tray가 손상되어 액면이 비정상적으로 낮아지거나 내부 구조물들이 본래 위치에서 벗어나 있는 등의 damage가 있는 것으로 판단되었다.

Stripping Column은 up-stream에서 생산된 product로부터 impurity를 제거하기 위한 공

정으로서 가동 효율은 공정의 productivity에 막대한 영향을 끼친다.

Column scanning 자료를 설계도면과 외부 구조물의 위치를 고려하여 분석한 결과 column에 missing tray, flooding 또는 weeping 등의 심각한 문제는 발견되지 않아, column이 비교적 건전한 상태로 운전되고 있음을 확인하였다. 또한 일부 tray의 liquid level이 비교적 높고, 그 상부의 vapor zone이 약간 좁은 것으로 나타나, form 형성이 의심되었으나 그 정도는 매우 경미한 것으로 판단되었다. 또한 column 하부의 liquid level(LL)을 정확히 측정하였다.

② 체재 시간 분포(RTD) 측정을 통한 반응기 진단

멜라민 생산 반응기는 하부로 유입되는 고온(400℃)의 urea ((NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO)를 원료로 하여 내부에 충전된 고체촉매에 의하여 멜라민(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>)을 제조하는 공정으로서 직경 5m, 높이 12m의 시설이다. 실험 당시 반응기의 멜라민 제조 효율이 저하되어 있는 상태였으나, 그 원인을 확인할 수 없어 방사성 추적자 기술로 가동중의 내부 상황에 대한 정보는 얻기 위해 본 실험을 실시하였다.

반응기 내부 물질의 유동 상황을 진단하고 가동 중 발생한 문제점의

원인 규명을 위하여 Ar-41과 Kr-79를 이용한 추적자 실험 및 밀봉 감마선원을 이용한 반응기 진단 실험을 실시하였다.

이 실험을 통해 반응기 내부의 유동성 촉매의 높이, feed gas의 flow rate, 반응기에서 gas의 체재 시간분포 및 평균 체재 시간, 순환 공정에서 gas의 평균 체재 시간, 반응기 내 추적자의 유동 패턴과 분포 등을 측정하였다.

③ 슬러지 소화조 진단 및 부동층 측정

하수 처리 시설의 소화조에 대한 방사성 추적자 실험으로 내부 부동층의 존재를 확인하고, 이 부동층의 제거를 위해 내부를 청소하였다. 그 후 소화조 효율의 척도인 가스 발생량이 증가하여 소화조가 정상적인 상태를 보였다.

소화조 내 부동층의 존재 유무에 따른 체재 시간 분포와 혼합 특성 등의 차이를 규명하기 위하여 정상 상태의 소화조를 대상으로 Sc-46를 이용한 추적자 실험을 수행하였다.

청소 전 추적자 실험 결과 16일로 측정되었던 평균 체재 시간이 소화조 내부를 청소하여 부동층을 제거한 후에는 약 52%가 증가된 30.8일로 나타났다.

이로써 이전 2회의 실험 결과로부터 소화조 하부에 두꺼운 부동층이 존재한다는 진단 결과의 타당성

과 추적자 기술을 이용한 진단의 신뢰성을 입증하였다.

#### ④ 장방향 침전조의 전산 유체 역학(CFD) 모델 검증 및 유체 거동의 가시화

침전조의 벽면에 세로 방향으로 네 개의 방사선 계측기를 설치하고 동일한 시간 간격으로 선로(guide rail)를 따라 정해진 위치로 옮겨가면서 얻은 실험 데이터를 가시화에 적용하였다.

이를 위하여 필요한 매 시간의 모든 위치에서의 데이터를 실험 데이터로부터 선형 내삽법(linear interpolation)으로 계산하였다. 방사선 계측기가 설치된 침전조 벽면을 격자(grid)로 구분하여 x, y 축으로 표현하고 매 시간 침전조 내부의 추적자로 표지(labeling)된 플러크와 물의 농도를 등고선(contour) 형태로 표현하였다.

등고선을 구하는 데는 Golden software사의 Surfer v7.0 프로그램을 이용하였다. 또한 Jasc software사의 Animation shop v1.03 프로그램을 이용하여 매 시간별로 구한 등고선 곡선을 연결(frame)하여 animation을 구성하였다.

#### ⑤ 하천 오염 물질 확산 측정을 통한 CFD 모델 검증

자연하천에서 오염 물질의 확산 및 혼합에 영향을 주는 물리·수학적인 인자들을 규명하고, 종·횡 방

향 확산 계수를 예측할 수 있는 확산 계수 예측 모형을 실험 자료로부터 개발하기 위한 연구의 일환으로 2회에 걸쳐 I-131을 이용하여 방사성추적자 실험을 수행하였다.

방사성 동위원소 추적자를 이용한 확산 실험을 통하여 얻는 데이터는 농도의 시간적인 분포를 측정하여 2차류와 난류 유속구조의 확산 현상에 미치는 영향을 분석하기 위한 자료로 이용된다.

#### ⑥ 방사성 추적자를 이용한 연안 환경 영향 평가 기술

방사성 추적자를 이용한 해양 환경 영향 평가의 국내 외 사례를 조사하였으며, 국내 연안의 문제점들을 수집하고 방사성 추적자 기술의 적용 가능성 등을 조사하였다.

외국의 기술 개발 현황의 경우 프랑스·캐나다·호주 등 선진국들은 물론 개발 도상국에서도 활발히 진행되고 있는 반면에 국내 연안 환경과 관련한 이 분야의 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

현재 우리나라의 연안 해양은 해안선 침식 및 퇴적, 폐기물 및 준설토의 dumping과 관련된 문제, 항만 및 항로 매몰 등의 심각한 문제가 발생하고 있는 실정이었으며, 이러한 연안 환경의 여러 가지 문제점을 해결하기 위해 정부, 지방 자치단체 및 학계는 물론 일반 국민의 관심이 높아지고 있어, 향후 이 추적자 기술에 대한 수요는 매우 클

것으로 예상된다.

## 4. 기타

### 가. Tc-99m Generator 생산 시설 설치

#### ① 사업의 목적 및 필요성

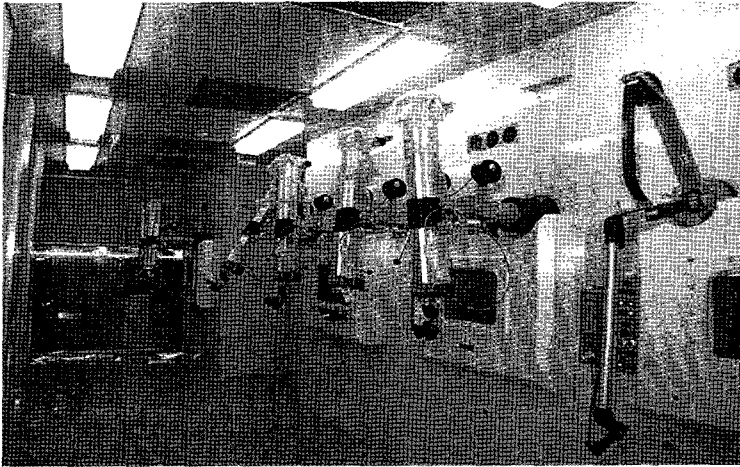
의료용 방사성 동위원소의 생산과 개발은 안전한 방사선 차폐와 의약품이라는 특성상, 인체의 투여에 따른 안전성 확보를 위해서 기준치 이상의 정정도가 유지, 관리되는 GMP(Good Manufacturing Practice)를 동시에 만족시킬 수 있는 시설과 장비를 사용하여 수행해야 한다.

이를 위하여 한국원자력연구소 하나로이용연구단은 KGMP 기준을 만족하는 방사성 의약품 제조 시설을 갖추고 validation 체계를 수립하여, 방사성 의약품 제조기술 개발을 위한 인프라를 구축하였다.

이는 앞으로 Tc-99m generator 제조와 새로운 Tc-99m 표지화합물의 개발, 치료용 신규 의료용 방사성 동위원소인 Sr-89 Chloride, Re-188등을 개발하는데 필요한 시금석이 될 것이다.

그 동안 다년간에 걸쳐 방사성 의약품의 제조에 관한 연구 개발을 수행한 한국원자력연구소가 차폐 시설과 GMP기준에 적합한 청정 시설의 복합 시설을 설계하고 건설한 다음, 이들을 검증하는 절차와 기술을 개발하고, 대외에 공개하여 민간





〈그림 5〉 하나로 동위원소 생산 시설에 설치된 Tc-99m Generator 생산 시설

기업의 활용을 용이하게 하고 제조 기술의 개발과 생산을 기업이 수행하는 것을 도와서 개발함으로써 우리나라의 방사성 의약품 제조 연구와 국산화 개발 및 제품화 보급에 앞장서고자 한다.

우선 다수요 품목과 고부가 가치 방사성 동위원소의 개발을 통하여 우수하고 저렴한 방사성 의약품을 생산하고 국내 공급은 물론 점차적으로 수요가 증가 추세에 있는 동남아 시장에 수출을 추진할 계획이다.

예를 들면 Tc-99m generator는 관련 제품을 포함하여 약 13억불(US \$) 정도의 세계 시장을 보유하고 있으며, 2005년에는 시장 규모가 약 22~25억불(US \$)에 이를 것으로 예측되므로, 궁극적으로는 아시아에서 방사성 의약품 생산국으로서의 명실상부한 위치를 확보할 수 있게 되어, 국내 방사성 의약품 산업계의 활성화를 기여할 수 있을 것이다. 2006년도에 서울에서 개최되는 세계핵의학회도 좋은 발

판이 될 것이다.

궁극적으로는 국내외에 방사성 의약품을 안정적으로 공급하여, 암 등 난치성 질환의 진단 및 치료의 효율을 증대시킴으로써 국민들의 건강 복지를 증진시킬 수 있으며 궁극적으로 삶의 질을 향상시켜 일반인들의 원자력에 대한 이해와 긍정적인 인식을 높이는데 크게 기여할 것이다.

경제적으로는 진단용 방사성 의약품의 국산화를 제고라는 국가적 요구에도 부응하여 외화 절감을 통한 선진국과의 무역 역조 현상을 개선함은 물론 중국·일본을 중심으로 한 동남아 시장 개척을 통한 수출 증진에도 이바지 할 것이다.

② 개발과 생산을 위한 기반 시설의 설치

한국원자력연구소 하나로이용연구단은 본 사업의 성공적인 수행을 위하여 2001년부터 2003년 3월까지 개발과 생산을 위한 기반 시설을 설치하고 시설의 성능을 검증하여

표준 절차를 마련하였다.

기반 시설은 Tc-99m Generator 생산 전용 Hot Cell 3기와 Sr-89 Chloride, Ho-166 착화합물 개발 및 생산 전용 Hot Cell 1기 및 GMP 시설과 제반 Utility로 구성되어 있다.

생산할 수 있는 최대 선량은 1회 생산시 Mo-99 300 Ci, Tc-99m 100Ci, 기타 핵종 100Ci이다. 기반 시설의 설치 과정은 납 Hot cell 4기의 제작은 중간 검수를 거쳐 제작업체의 현장에서의 제작을 완료하고 제작물의 공장에서 최종 검수 및 survey test를 거쳐 2002년 12월 중순부터 하나로 건물내 1층 Bank 4에 Hot cell을 설치하는 작업을 착수, 계획된 공정 내에 Hot cell 및 부대 설비인 원격 조작기와 차폐창의 설치 및 차폐능, 기밀성 시험, 비파괴 시험 및 조작 시험 등의 성능 시험을 성공적으로 완료하였다.

Clean room 제작 설치와 성능 시험은 필요한 급기량을 확보하기 위하여 기존 급기 설비에 대한 TAB를 완료하고 Hot cell의 배기 정제를 위한 필터뱅크를 제작하였으며, 최종 성능 시험을 완료하였다.

최종적으로 과기부 사용전 검사를 2003년 7~8월에 수검 받아 통과하였고 기반 시설 임대 업체로 선정된 (주)삼영유니텍과도 임대 계약을 체결하여 현재 완공된 의료용 방

사성 동위원소 개발과 생산을 위한 활용도를 극대화 하였다.

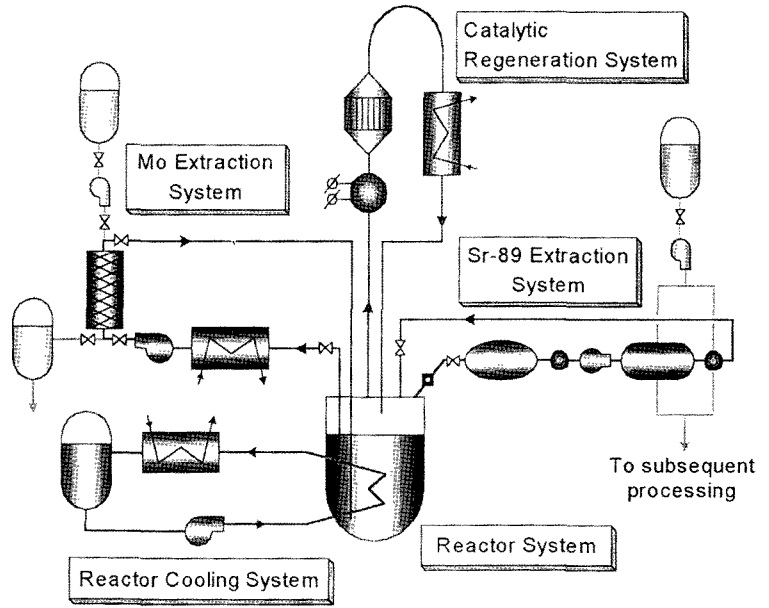
나. 의료용 동위원소 생산로 건설 계획

한국에서는 의료용 동위원소(MI)의 안정적인 경제적 공급 요구에 따라 MI 생산로의 건설을 검토해 오고 있었다. 그러던 차에 최근 한국 정부의 방사선 기술 진흥 정책에 부응하여, 의료용 동위원소 생산로(Medical Isotopes Producer; MIP)로 명명한 생산 시설을 건설하는 사업을 기획중이다.

이 사업은 두 단계로서 6년간에 걸친 사업이다. 급년에 진행중인 예비 과제에 이어서, 3년에 걸친 첫 단계에서는 주로 원자로 계통과 MI 분리/정제 분야의 요소 기술들을 입증 또는 개선하는 데 집중하고, 다음 3년간의 제 2단계에서 상세 설계를 개발하고 시설을 건설할 예정이다.

대규모 건설 사업으로서, 연구소 뿐만 아니라 설계 회사, 중공업 회사, 건설 회사부터 규제 기관에 이르기까지 거의 모든 원자력 산업계가 사업에 참여하게 될 것이다.

요소 기술의 입증/개선에는 주로 러시아 연구소들과의 국제 협력이 효과적일 것이다. 소요 재원의 60%를 한국 정부가 지원할 것을 요청하고 있고, 나머지 40%에 대해서는 국내외 민간 기업의 투자를 기대하고 있다.



〈그림 6〉 의료용 동위원소 생산로 개요

MIP는 각각 50 kW짜리 원자로 2기와 공용 MI 취급 시설로 구성된다. 이러한 구성은 개념적으로 러시아의 제안과 같다. 우라늄 수용액 핵연료는 연료이자 동시에 유용한 동위원소들이 핵분열 생성물로서 만들어지는 표적이기도 하다.

회수 대상 핵종으로서 Mo-99 (Tc-99m의 모핵종), Sr-89, Sr-90, I-131, Xe-133, Cs-137이 있다. 핵연료에서 생성되어 섞여 있는 Mo-99는 핵연료가 흡착탑을 지나 흐르는 동안 흡착 컬럼에 흡착되었다가 취급 시설에서 용리 및 정제 과정을 거쳐 생산된다.

기체 상태의 원소, 예를 들어 Sr-89의 모핵종인 Kr-89는 원자로 용기 안의 공간에 모인 핵분열 기체 등의 혼합 기체에서 분리한다.

원자로 시설의 주요 계통으로는 원자로 제어 계통 및 보호 계통을 포함하는 원자로 계통, 원자로 냉각 계통, 수소 재결합을 위한 촉매 재

생 계통 등이 있다.

분리해 낸 MI의 후속 처리(주로 정제)는 원자로 시설에서 떨어진 MI 취급 시설의 베타-감마 핫셀에서 이루어진다.

비교적 쉽게 해결이 가능해 보이는 몇 개 기술적 문제 이외에도 아직 미결로 남아있는 문제들이 있다. 가장 결정적인 것은 MIP의 경제성이다.

원자로가 저출력인 덕분에 MIP의 건설비는 상당히 싸서, 예컨대 캐나다 MMIR의 1/2 이하 수준일 것으로 기대된다. 그렇다 해도 경제성 분석에 의하면 해외 시장, 특히 일본과 중국의 Mo-99 시장에 진출하여야만 건설 타당성이 있을 것으로 예비 분석되었다.

이 점에서 특히 이제 한국에 건설할 MIP는 동아시아의 MI 산업에 경제적인 뿐만 아니라 안정적인 RI 공급에 기여할 것으로 기대된다.



## RT 이용 분야의 향후 전망

### 가. Neutron Transmutation Doping

전세계적으로 NTD 서비스를 하고 있는 원자로는 15개 정도이나 대부분이 40년 이상 운전한 것이어서 수가 줄고 있다. 새로 건설하는 연구용 원자로는 몇 개에 불과하지만 대용량의 NTD 기능을 갖는 것도 있다.

하나로는 향후 수 년간 기존 원자로의 퇴역에 따르는 공급 불안 문제를 해소하고, 이후 새 원자로와 경쟁하면서 안정적인 공급에 기여할 것이다.

NTD 웨이퍼를 생산하는 회사는 일본에 3개, 독일과 덴마크에 각 한 개씩 모두 5개이며, 중국에는 자국내 공급하는 회사가 있는 것으로 추정된다.

1990년대에는 가스 도핑 기술의 발달로 NTD 영역이 침식당하여 연간 70톤 수준으로 줄었으나 앞으로 Power Device의 발전과 함께 NTD 수요는 다시 증가할 것으로 기대된다.

특히 탄산가스 배출 문제로 수소를 이용하는 연구가 활발한데, 수소를 이용한 연료 전지의 사용 등이 증가하면 NTD 수요는 크게 증가할 것으로 예상된다.

아직 국내에서는 NTD 반도체 재료인 플로팅존 실리콘 단결정을 생

산하지 않고 있으나 하나로가 대용량의 NTD 기능을 가지고 있으므로 국내에서 NTD-Si를 생산하는 것이 국제적인 경쟁력을 가질 수 있으며, 국내의 대전력 반도체 소자 산업 활성화도 꾀할 수 있을 것이다.

### 2. Neutron Radiography

미국 및 유럽에서는 1980년도부터 가속기형 및 방사선 동위원소형 중성자 투과 비파괴 검사 장치가 개발되어 항공기 비파괴 검사에 활용되고 있다. 항공기 결함의 대부분을 차지하는 내부 부식 결함은 X-ray나 초음파 검사로 탐지할 수 없어 중성자 투과 비파괴 검사 방법이 사용되고 있다.

국내에서도 2003년도부터 한국 원자력연구소를 주축으로 국방부, 3개 대학 및 2개 업체가 참여하여 이동형 항공기 중성자 투과 비파괴 검사 장치 개발 타당성 연구를 수행하고 있다.

장치가 개발 완료되면 F-15k 전투기 등의 비파괴 검사에 사용될 계획이다. 이러한 가속기형 및 방사선 동위원소형은 공항 검색대에서 마약·폭발물을 검색하고, 상수도 누수 및 송유관 누유 등을 탐색할 수 있어 그 활용도가 기대되며 미국·프랑스·일본 등이 개발에 착수하고 있다.

중성자 투과 비파괴 검사 방법 중 autoradiography 방법은 탄소 및

산소 분포에서 활용될 예정이다. 앞으로 이용의 범위가 고고유물 분야에 까지 이용될 예정이며 CCD 카메라를 이용한 실시간 및 토모그래피(tomography) 영상법을 개발하여 50 $\mu$ m 정도의 크기의 결함을 3차원적으로 평가가 가능하여 항공기 부품의 국산화 개발에 활용하고자 한다(그림 4).

2002년부터 일본과의 국제 공동 연구의 일환으로 화훼의 수분 분포, 토양속의 인삼 뿌리 재배과정 및 소형보일러/엔진의 노즐 분사의 동적 현상을 연구중이다. 생산지로부터 소비자까지 신선한 과일 및 꽃을 배달하는 저장 방법을 개발하고 토양속의 인삼 재배 과정에서 뿌리 성장에 미치는 환경적인 요인 및 병충해를 방지할 수 있는 신재배법을 개발하여 한국 인삼의 옛 명성을 다시 찾고자 한다.

소형 열교환기 및 알루미늄 엔진 개발의 연료 분사 현상을 동영상화할 수 있어 자동차 사업의 엔진 개발에 사용될 예정이다.

최근에 들어서 중성자 라디오그래피(neutron radiography)를 이용한 직접 메탄올 연료 전지(DMFC: direct methanol fuel cells), 고분자연료전지(PEMFC: proton exchange membrane fuel cells) 및 고체 산화물 연료 전지(SOFC: Solid Oxide Fuel cells) 등의 anode, cathode,

MEA(membrane electrode assembly)로 구성된 유동장(flow channel)내의 연료(수소·메탄올) 및 생성물(물·이산화탄소)을 분석할 수 있는 중성자 실시간 영상 장치 및 분석 기법이 선진국에서 활발히 개발되고 있다.

미국은 DOE와 NIST(National Institute of Standard and Technology)가 공동으로 연료 전지 상용화 개발을 위하여 NIST의 20MW급 연구용 원자로 중성자 빔 튜브(N6)에 전용으로 중성자 래디오그래피 영상 장치를 설치하여 2002년부터 운전하고 있다. 따라서 국내에서도 10대 성장 동력 사업으로 선정된 연료 전지가 실용화될 수 있도록 중성자 래디오그래피(NR) 기술을 적용하고자한다.

### 3. 방사성 추적자 이용 기술

산업 분야 적용을 위한 추적자 이용 기술은 현장의 문제를 시급히 해결할 수 있어야 하며, 환경 분야 기술은 장기간의 실험이 필요하므로, 외국 기관보다 국내 추적자 기술의 경쟁력이 높다.

장치 산업이 발달된 우리 산업계의 잠재적 추적자 기술 수요는 클 것으로 예상되며, 원자로 등 추적자 기반 시설이 갖추어져 있어 산업화가 가능할 것으로 기대된다.

대표적인 환경 시설인 하수 처리장의 소화조·침전조·혼화조 등

각종 시설 진단 추적자 기술은 타진단 기술로는 불가능한 정보를 얻을 수 있어 실용화 가능성이 높다.

CFD/RTD 복합 이용 기술은 IAEA의 국제 협력 연구 프로그램에 선진국과 대등하게 참여하여 추적자 기술의 발전 및 이용 확산에 기여할 것이다. 이와 더불어 주요 추적자 기술의 표준화 등을 통하여 산업계에서 추적자 기술의 신뢰도·정확도 및 경쟁력 등을 인식시킬 수 있는 작업이 필요할 것으로 예상된다.

또한 가동중 시설에 대한 진단 기술뿐만 아니라 공정의 설계 단계부터 최적의 설계 인자를 도출하기 위한 추적자의 응용 기술 개발도 선진국에서 활발히 연구되고 있다.

이를 위해서는 추적자로 사용되는 방사성 동위원소의 제조와 투입 장치 개발, 방사선의 검출 및 차폐 장치의 설계 기술 개발이 요구된다. 방사성 추적자를 사용하면 대규모 해양 공사(항만 건설, 외곽 시설 건설, 준설, 투기 등)에서 환경 관리 비용의 절감을 도모할 수 있으며, 해수욕장의 모래 유실에 따른 각 지방 단체의 경제적 손실을 줄일 수 있다.

또한 연안 환경 오염 때문에 발생하는 각종 문제를 해결하거나 경감시킬 수 있는 방안을 도출할 수 있는 기초 자료로 활용할 수 있다.

연안 환경에 여러 가지 문제점이

대두되고, 학계는 물론 일반 국민의 관심이 높아지고 있어, 향후 이 추적자 기술에 대한 수요는 매우 클 것으로 예상된다.

### 4. 기타

#### 가. Tc-99m Generator 생산 시설 설치

현재 기반 시설 임대 업체인 (주)삼영유니텍에서 Tc-99m Generator의 개발과 생산에 필요한 Fission Moly 용액의 희석, 분배, Sorption Column의 Loading 장치와 조립 포장 기타 생산에 필요한 설비를 Hot cell 내부에 설치중에 있고, 기반 시설의 운전 조건과 관리규정에 맞게 생산 시스템을 합리적으로 구성하고 있으며, 과학기술부와 식품의약품안전청의 생산 및 제조 허가를 추진중에 있다.

현재의 계획으로는 2003년 11월 까지 제반 조건을 충족하여, 금년 말경이면 시제품을 생산할 수 있을 것으로 전망된다.

Tc-99m Generator의 국내 시장은 약 40억 정도의 규모로 기반 시설에서 국산화 제품이 출시되면 약 30억 정도의 시장이 형성되어 약 120여개에 달하는 종합병원 규모의 국내 의료 기관에서도 10억원 정도의 원가 절감 요인이 발생되어, Generator 보급의 저변 확대로 각종 장기 암·종양에 대한 진단 등에 대한 보다 많은 진료 혜택을 받



을 수 있을 것으로 예상된다.

아울러 국내 시장의 안정적인 공급으로 신뢰성이 확보되고, 국제 수준의 GMP 규격에 입각한 생산 표준화와 품질 보증 체계가 수립되면 중국과 일본 등의 동남아 시장으로 진출할 계획이다.

아울러 말기 암 환자의 통증 완화 치료제인 Sr-89 Chloride도 환자 1인당 4mCi 투여 기준으로 국내에서 약 10억원의 매출이 가능하다. 향후 국제적인 우수 방사성 의약품 판매 업체를 통한 미국과 유럽 시장에 대한 수출도 검토하고 있으며, Re-188 Generator, Ho-166등의 치료용 착화합물의 개발과 생산에 대한 사업성과 개발 계획 및 기간을 현재 면밀하게 검토중에 있다.

#### 나. 의료용 동위원소 생산로 건설 계획

의료용 동위원소는 대체로 원자량에 따라 그 생산 방법이 다르다. PET 용의 가벼운 핵종은 주로 가속기를 이용하고 그 외에는 원자로에서 표적을 조사하여 생산하고 있다.

원자로 생산 방법에는 주로 (n,  $\gamma$ ) 같은 특정 핵반응을 이용하여 특정 핵종만을 생산하는 방법과 핵분열 생성물로부터 생성된 여러 핵종 중에서 필요한 핵종을 선택적으로 추출하는 방법이 있다 현재 원자력 연구소에서는 「하나로」를 이용하여 전자의 방법으로 다양한 핵종을 생

산 공급하고 있다.

이번에 계획중인 의료용 RI 생산 전용로는 후자에 해당되는 핵종의 생산에 필요한 새로운 개념의 특수 목적 소형 원자로로서 아직 검증된 기술은 아니지만 러시아·일본·미국 등과 기술 협력을 통해 개발한다면 충분히 성공할 수 있을 것이다.

이 방법을 통해 의료용으로 수요가 많은 Mo-99(Tc-99m), Sr-89, Sr-99(Y-90), I-131 등의 대량 생산이 가능하며, 동 분야의 동북아 RI 생산 센터로서의 위치를 확고히 할 수 있을 것이며 수출을 통한 RI 산업 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다.

### 결론

정부의 RT 개발 및 관련 산업의 육성 정책에 부응하기 위하여 RT 관련 전문가들이 모여 제1단계 원자력 기술 지도(NuTRM) 1단계 작성 완료되었으며 현재 제2단계로서 보다 구체적인 작업이 진행중이고 금년 9월 말까지는 원자력 전 분야에 걸쳐 Macro 기술 지도 작성까지 완성될 계획이다.

즉 2030년까지 미래 사회 환경과 원자력 수요 전망, 국내외 경쟁 현황 분석 및 대응 방안을 마련하고 비전과 목표를 제시하며 이를 위한 전략 제품이 무엇이며 그 해당 핵심 기술은 무엇인가를 도출하는 것이

Macro 기술 지도의 개략이다. 이후에는 각 기술에 대한 세부 지도를 작성함으로써 전체적인 NuTRM이 2003년 말까지 완성될 것이다.

RT의 첨단 산업 이용은 주로 IT·NT·BT·ET 등과 융합 기술로서 서로 접목될 때 시너지 효과를 얻을 수 있고 고부가 가치 제품 개발이 가능할 것이다.

국내에서는 거대 국가 연구 시설인 「하나로」 및 「포항방사광가속기」를 이용한 첨단 기술 및 제품의 개발이 가속화될 것으로 전망되며 앞으로는 현재 추진중인 양성자 가속기 건설 사업이 완성되면 국가 위상 제고에도 큰 몫을 할 수 있을 것이다. 이들 시설을 효율적으로 활용하기 위해서는 산·학·연의 협동 연구 및 인프라 구축이 필수적이며 정부의 재정적 지원은 그 무엇보다도 중요하다.

RI 생산 분야에 있어서는 계획중인 RI 전용로가 2007년에 완성되면 「하나로」와 더불어 RI 생산의 구성체가 될 것이며, PET용 소·중형 가속기가 국내 연구 기관 및 병원에 설치되어 자급자족할 수 있는 여건이 조성되고 있어 향후 2010년경에는 우리 나라가 RI를 이용한 국민의 삶의 질 향상에 크게 기여할 것이며, 원자력 전반에 대한 국민들의 이해 및 수용성 제고에 큰 몫을 할 수 있을 것이다. ☞