

Brookhaven 국립연구소

이 영 복

Brookhaven 국립연구소는 이차대전 직후 원자력 연구에 대규모의 연구설비를 피로로하던 과학자들의 욕망을 만족시키기 위하여 1947년 뉴욕 시동쪽 100km 지점인 Long Island의 Upton에 설립되었다. 미국 원자력위원회 산하의 단 국립 연구소들과 마찬가지로 Brookhaven도 원자력위원회와의 계약밑에 사설법인체인 Associated Universities, Inc.에 의하여 년간예산 5000만불로 운영되고 있다. 이 단체의 역할은 미국내 대학과 연구기관들이 협력하여 미국정부가 목적하는 과학연구와 과학교육의 발전을 도모하는데 있다. Associated Universities, Inc.를 주관하는 이사회는 이 단체를 발기한 9개대학 Columbia 대학, Cornell 대학, Harvard 대학, John Hopkins 대학, Massachusetts 공과대학, Princeton 대학, Pennsylvania 대학, Rochester 대학, Yale 대학으로부터 각기 한명씩의 과학자와 행정요원으로 구성되어 있다.

이 연구소의 연구내용은 물리학, 화학, 생물학, 공학, 의학 전반에 걸친 기초과학 연구와 응용 그리고 새 기술의 개발을 목적으로 하고 있으며 연구소시설을 최고 능력으로 사용하게 하고 연구원들의 재능과 능력을 최고도로 발휘하도록 되어 있다. 이 연구소와 관련된 대학의 교직원과 대학원생뿐만 아니라 많은 외부대학과 외부연구기관으로 부터의 연구원들도 초청 또는 특별한 알선에 의해서 연구소의 연구계획에 협조하고 있다. 현재 연구소직원은 과학자와 각종 기술요원을 합하여 약 3000명이며 지난 1년동안 연구소 시설을 사용한 외부대학과 외부연구기관에서 방문한 과학자들과 대학원생의 총수는 약 600명이나 된다. 1970년 1년동안에 이 연구소에서 나온 논문과 보고서의 수만해도 1000편이 넘는다. 이 연구소의 연구분야는 너무 광범위하여 각부문의 전문가가 아니고서는 전반에 걸친 연구현황을 소개할 수 없다. 그러므로 다만 이 연구소의 연구내

용의 요점과 주요 연구시설만을 소개하려 한다.

연구내용

이 연구소의 연구내용은 이 연구소가 갖고 있는 두개의 주요 연구시설인 33-Gev Alternating Gradient synchrotron과 High Flux Beam Research Reactor의 사용을 중심으로 다음의 4가지 항목으로 나눌 수 있다.

1. 물질구조에 관한 기초연구

첫째 이 항목에 속하는 것은 소립자물리학실험으로 이 연구소의 33-Gev Alternating Gradient Synchrotron에서 가속된 고에너지 양자를 중수 핵자에 충돌시켜 여기서 발생한 핵반응을 조사하고 있다.

이 반응에서 발생하는 입자들의 방향과 에너지분포는 Scintillation Counter, Bubble Chamber, Spark Chamber, Photographic Emulsion 등에 의하여 측정되며 많은 새로운 소립자와 핵반응이 이 연구소 고에너지 연구구름에 의해서 발견되었다. 둘째로 저에너지물리실험과 핵화학실험에서는 High Flux Beam Research Reactor와 60-inch Cyclotron, Van de Graaff에서 발생시킨 저에너지입자를 target에 충돌시켜 발생하는 핵자들의 energy level, spin, parity, half-life 등을 측정하고 있다. 셋째로 고체물리와 분자화학실험에서는 결정구조와 분자구조를 중성자와 X-선회절기술로 연구하고 있다.

2. 방사능의 물리, 생물, 화학적 효과에 관한 연구

고체물리에서는 금속이나 결정체에 중성자 또는 감마선을 쬐어 이때 일어나는 radiation damage, defect, dislocation 등의 성질을 조사하고 있으며 화학에서는 유기물질에 방사능을 쬐었을 때 일어나는 변질이나 화학반응을 연구하고 있다. 생물학에서는 식물이나 동물에 방사능을 쬐

있을때 방사능이 생물체의 세포뿐만 아니라 구성 분자에까지 미치는 영향을 연구하고 있다. 유전학의 문제로는 방사능에 의해서 식물에 발생하는 종양, 방사능으로 발생시킨 돌연변이에 의한 종자개량, 감마방사능이 생태학적변화를 일으키게하는 과정등이 있다. 생물물리학에서는 radiation damage의 근본원인과 포뉴동물의 방사능에 의한 노쇠현상의 생리학적작용을 연구하고 있다.

의학에서는 진단과 치료방법의 개선을 위하여 직접 인체에 방사능을 사용하는 연구를 하고있다. 단일세포나 신체에 이온화 방사능을 쬐이면 자연적으로 발생하는것과같은 병과 독소를 발생시킬 수 있다. 그러므로 방사능이 세포나 신체에 미치는 영향을 이해한다는것은 즉 변균의 원인을 이해한다는 것이라 할수있다. 이에 관련된 문제로는 이온화 방사능이 동물의 면역작용에 미치는 영향, 가속기로 부터의 입자를 동물에 쬐었을때 신체에 미치는 영향, 신체내의 tracer를 방사능으로 추적하여 진단대사를 조사하는 방법, neutron capture therapy, neutron activation analysis 등이 있다. 이러한실험은 Van de Graaff와 60-inch Cyclotron, Cosmotron, 의 학연구용 원자로 등의 시설을 사용한다.

3. 동위원소의 응용

방사성 동위원소는 그위치를 쉽사리 추적할 수 있으므로 tracer로 사용된다. 화학과 생화학에서는 방사성 동위원소를 사용하여 화학반응을 용이하게 결정 할 수 있고 복잡한 합성물을 식별하는데 사용하고 있다. Chromosome과 단백질 같은 복잡한 유기분자의 구조와 광합성과 같이 복잡한 생화학반응을 연구하는데 방사능 tracer의 사용이 무엇보다 중요하다.

4. 연구용 특수기구의 개발

Brookhaven의 가속기 발전계획에는 100~1000Gev 초고에너지 가속기의 설계와 제작이 포함되어 있다. 이런 가속기를 위하여는 더 강력한 전자석을 피로로 하는데 현재 60~80KG를 낼수 있는 Superconducting Magnet의 설계와 제작을 하고있다. 이 전자석은 4°K의 저온에서 운영해야하므로 액체헬륨을 냉각제로 사용하고 있다. 이에 따라 가속장치에 사용하는 rf system

의 cavity도 superconducting cavity로 발전시키는 과정에 있고 현 33-Gev Alternating Gradient Synchrotron은 장차 100-Gev Cold Magnet Synchrotron으로 대체할 계획이다.

원자로분야에 있어서도 더 발달된 고성능 원자로를 연구 설계하고 있으며 High Flux Beam Research Reactor는 이곳에서 발전시킨 새로운 개념에서 설계된 원자로로 강대한 중성자 beam을 낼 수 있다. 이외에도 원자로에 사용하는 특수금속과 연료의 개발 그리고 더안전한 방사능 폐물처리장치 등의 연구를 하고있다.

가속기 시설

Brookhaven의 연구내용 중 제일 중요한 부분을 차지하고 있는 것은 초고 에너지 가속기의 설계와 설치 그리고 그것을 사용하는 고에너지 물리학 실험이라 하겠다. Brookhaven에 있는 각종 가속기와 그 용도는 다음과 같다.

Alternating Gradient Synchrotron : 이 연구소에서 설계되고 건설된 세계최대의 양자가속기로 1960년에 준공되었다. Cockcroft-Walton Generator에서 750,000 volt에 이른 양자가 200-Mev 선형가속기를 거쳐 Alternating Gradient Synchrotron의 궤도에 투입된다. 양자를 가속시키는 이 가속기의 주요부분은 6×6m 단면으로 뚫인 직경 250m의 원형 지하터널에 설치되어 있다. 이것은 원형의 진공 chamber로 240개의 강력한 전자석이 chamber 주위를 돌아가며 장치되어 있다. 이 전자석의 자장은 양자를 원형궤도로 정확히 유지시키는 작용을 한다. 가속은 rf system을 사용하는데 1초내에 양자는 300,000번 이 기계내를 돌고 30-Gev의 에너지에 도달하게 된다. 1초가 채 넘기전에 양자는 광속의 99.9%에 이른다. 이때 양자 beam은 전자석에 의하여 chamber 밖으로 나오게되며 터널주위의 실험건물들 내에 장치한 target에 충돌하도록 장치되어 있다. 양자가 target의 핵자에 충돌하여 일어나는 핵반응과 이반응에서 발생한 각종 고에너지 입자들은 Bubble chamber, Spark chamber, Scintillation counter, Photographic emulsion 등으로 측정된다.

Bubble Chamber와 Spark Chamber는 고에

너지 물리실험에서 제일 발달된 장치이다. Alternating Gradient Synchrotron에는 81-inch, 31-inch, 30-inch, 7-inch 크기의 4개의 Bubble Chamber를 사용하고 있다. 80-inch Deuterium Bubble chamber는 지난 1년간 약 70만장의 사진을 찍었으며 이 사진들은 scanner들에 의하여 조사되고 사진에 나타난 비적들은 전자계산기에 의하여 에너지가 측정되고 입자의 종류가 분류된다. 이 전자계산기는 또 전자계산센터의 CDC6600 전자계산기에 연결이 되어있어 모든 측정 결과가 자동적으로 이곳에 수록된다. 이런 Data processing 시설은 고에너지 핵반응과 각종입자의 통계뿐만 아니라 연구원들의 사용을 편리하게 한다. 이곳 Bubble chamber에 의한 실험에서 많은 새로운 핵반응현상과 새로운 입자들이 발견되었다. 현재 12개대학 실험그룹이 Bubble chamber를 사용하여 7개종목의 실험을 하고있다. 31-inch, 30-inch Bubble chamber는 수소, 중수, 수소-네온 혼합을 사용한 세가지 실험에서 약 70만장의 사진을 찍었다. 7-inch Bubble Chamber는 30KG의 Superconducting magnet를 사용하여 neutrino interaction을 조사하는데 쓰이고 있다.

Spark chamber는 입자의 위치와 momentum을 더 정확히 측정할 수 있으며 data processing의 결과에 의하면 spark Chamber가 Bubble Chamber보다 통계적으로 더 정확함을 보여주고 있다. 어떤 경우에 있어서는 대단히드문 핵반응을 가려내는데 Bubble Chamber보다 더 유리한 점이 있다. 현재 한 연구그룹은 digital spark chamber를 발전시키고 있는데 이것은 Spark Chamber와 Proportional chamber를 합친것으로 3차원적 resolution이 Bubble Chamber와 거의 동등하며 측정결과를 기록하는 방도가 재래식 Spark Chamber에 비해서 꽤 간단하다.

Cosmotron : 이 가속기는 1952년 세계 최초로 GeV 에너지를 넘긴 직경 25m 인 도넛형 양성자가속기로 3-GeV 까지 도달할 수 있다. 양자는 정전가속기에 의해 이 가속기의 궤도로 투입된다. 1초동안에 양자는 316,000km의 거리를 여행하고 3-GeV의 에너지에 도달된다. 이 가속기도 고에너지 물리실험에 쓰이고 있다.

Tandem Van de Graaff : 3단계로 된 이 가속기의 마지막 단계가 현재 설립중인데 이것이 완성되면 양자를 30-MeV 까지 가속시킬 수 있다. 이 가속기는 또 수소보다 무거운 이온들을 가속시킬 수 있으며 에너지범위가 4-MeV부터 30-MeV까지의 핵구조실험에 사용된다.

60-inch Cyclotron : 1966년에 전자석과 rf Oscillator를 개조한 이 Cyclotron은 deuteron, alpha 입자, helium 이온을 각각 20, 40, 60-MeV 까지 가속시킬 수 있다. 이 가속기는 핵반응실험과 방사성물질 제조에 쓰이며 생물체의 방사선에 대한 효과를 연구하는데도 사용되고 있다.

Research Van de Graaff, Vertical Accelerator, Chemistry Van de Graaff : 이들 가속기는 proton, deuteron, helium 이온들을 2~3MeV 까지 가속시킬수 있어 저에너지물리, 고체물리, 화학분자구조 등의 실험에 사용되고 있다.

원자로 시설

Brookhaven에서 소립자물리실험을 제외한 모든분야의 실험은 직접 간접으로 원자로와 관련이 되어있다.

High Flux Beam Research Reactor : 이 원자로는 1950년이래 사용해오던 Brookhaven Graphite Research Reactor의 대체를 위하여 1965년에 건설된 원자로로 강대한 중성자 beam을 내도록 설계된 것이다. 출력 40MW로 최고 중성자 flux는 1.6×10^{15} 이다. 이 원자로는 16개의 실험설비를 갖추고 있는데 7개는 irradiation 실험을 위한 것으로 원자로 내에 있고 9개의 중성자 beam이 나오는 창구가 원자로주위를 돌아가며 배치되어 있다. 이 창구를 통하여 외부로 나오는 중성자 beam은 chopper 나 Spectrometer를 거쳐 resonance, crystal diffraction, fast neutron cross section 등의 측정에 사용된다. 이 원자로는 중심에 농축우라늄 연료가 들어가게 되어 있고 중수가 이것을 둘러싸고 있는데 중수는 냉각재, 감속재, 반사재의 세 역할을 동시에 하게되어 있다. 원자로건물의 지하실은 원자로 운전 전에 사용되는 기계설비가 되어있고 일부는 사용한 연료의 저장실로 사용하고 있다. 1층은 원자로와 실험실로 되어 있으며 2층은 조정실과 irr-

adiation 실험, 연료작업실로 되어있다.

의학연구용 원자로 : Brookhaven 연구센터의 일부인 이 원자로는 의학물리학, 병리학, 미생물학, 생화학, 생리학 연구실과 직접 연결되어 있다. 원자로 핵심부의 농축우라늄은 천연수물 냉각제와 감속재로 사용하며 반사재로는 흑연을 사용하고 그냉각은 공기로서 하게 되어있다. 최고 중성자 flux는 2×10^{15} 이며 중성자 beam은 원자로 양쪽에 뚫린 두 창구를 통하여 나오게 되어 있다. 사용치 않을때 이창구는 20톤의 강철과 콘크리트로 된 문으로 닫는다. 한쪽 중성자 beam 창구는 인체내에 흡수시킨 tracer를 중성자 irradiation으로 추적하여 신진대사를 조사하는것과 neutron capture를 이용한 치료법등의 방사성치료법의 연구에 쓰인다. 딴 한 쪽의 창구는 동물을 사용하여 위 실험을 보충하는 실험을 하고있다. 이외에도 큰 대상물을 위한 irradiation설비 적은 샘플의 activation analysis와 짧은 생명의 방사성물질들을 제조하는 설비를 갖추고 있다.

기타 특수시설

High Intensity Radiation Development Laboratory : 이 실험실은 200만 큐리의 Cobalt-60과 Cesium-137를 사용하여 100만 큐리 범위에서의 여러가지 방사능 Source에 대한 공업용 data를 작성하는 것과 위험한 방사능 source를 안전하게 취급하는 방법을 발전시키는데 그 목적이 있다. 이 data는 넓은범위의 방사능 에너지를 사용하는 irradiation 시설을 설계하는데 필요하다. 가속기와 원자로에 사용되는 안전용 기구들의 test를 여기서 하며 바다에서 잡은 고기를 소독하는 선박용 irradiator와 곡물을 저장하기 전에 해충을 살해하는 곡물용 irradiator의 제작과 개조를 하고있다. 이 실험실에는 2개의 밀폐실이 있는데 하나는 방사능 source로 실험하는 irradiation실이고 딴 하나는 실험에 사용되는 방사능 source를 처리하는 준비실이다. 실험중인 연구원의 안전을 위하여 밀실의 벽은 두꺼운 콘크리트로 되어 있고 출입구는 15-inch 두께의 납으로 만들어져 있다. 밀실을 드러다보는 창구도 납이 섞인 유리창으로 되어있고 이 창구로 안을 드러다보며 원거리조정기를 사용하여 실험을 하

게 되어있다.

Brookhaven Gamma Field : 야회 감마방사능 실험장은 방사능식물학의 기초문제인 식물의 돌연변이, 식물의 방사능에 대한 감수성, 식물에 생기는 종양의 형성, 방사능에 의한 변종등을 조사 할 목적으로 설치되어 있다. 너비 10acre인 정방형의 실험장 중심에 3200 큐리 Cobalt-60 감마 source가 수직파이프 안에 장치되어 있고 연구원이 이 실험장을 출입할때는 source를 지하로 들어가게 되어있어 인체에 대한 피해를 방지하고 있다. 식물들을 꽃분에 넣은다음 source 주위에 원형으로 배치시켜 하루 20시간씩 계속하여 방사선을 쬐이고 있다. 더 장기간의 irradiation 효과를 조사하기 위하여 온실에 적은 Cabalt source를 장치하고 식물에 감마선을 일년 내내 쬐이고 있다.

Brookhaven Ecology Forest : 이 연구계획은 Brookhaven의 방사능 생태학에 관한 연구사업의 일부로 실험림에 장치한 낮은 이온화 방사능 조건이 장기간 계속될때 생물체에 일어나는 변화를 조사하는것이 그목적으로 1961년에 시작되었다. 여기서는 오랜세월을두고 이온화 방사능을 쬐었을때의 radiation damage의 한계, 유전학적 효과, 생리기능의 변화, 기생식물의 성장등에 관한 data를 계속하여 모으고 있다. 연구소 동북방에 위치한 50acre의 실험림 중심에는 9500 큐리의 감마 source인 Cesium-137을 담은 파이프가 탐위에 매달려 있다. 노출율은 높을때는 하루에 약 6000 룬트겐에 이른다. 현재 source 주변의 초목들은 방사능 때문에 죽은것을 볼 수 있다.

Brookhaven 기상학 연구용 탑 : 1969년에 폐쇄된 Brookhaven Graphite Research Reactor를 건조할 당시 이 원자로에 사고가 발생했을때 110m 높이의 stack에서 방출될 방사능에 대한 조치를 강구하기 위하여 140m 높이의 기상연구용 탑을 설립 하였다. 이때 방사능 물질의 확산을 결정하는 기상조건을 재빨리 알아 내는 것이 중요하다. Brookhaven의 기상학그룹이 이 탑의 관측으로부터 고안 해 낸 Brookhaven Gustiness Classification은 원자로 사고시의 대책을 위하여서 뿐만 아니라 공기오염의 문제를 연구하는데도 필요한 기상학적 요소로 널리 사용되고 있다.