

중이온 과학의 지평

- 식물에의 이용을 생각한다 -

(배창휴)¹⁾

원소의 주기율 표에는 약 100종류의 원소가 있으나 수소와 헬륨을 제외한 대부분은 무거운 원소이다. 원자로부터 몇 개인가의 전자를 얻어 전하를 띠게한 입자를 이온이라하고 특히 헬륨보다 무거운 원소이온을 중이온(의학분야에서는 중립자라고 함)이라 한다. 전자, 양자. 그밖의 이온을 전자의 힘을 이용하여 가속함으로써 고속의 입자선을 인공적으로 만들어 내는 장치인 가속기 중에 링사이크로트론(이하RCT)은 중이온을 가속하고 고에너지 비임을 발생시키는 실험장치이다. 중이온은 물질을 통과할 때 그 궤적에 따라 물질에 부여하는 에너지가 다른 방사선에 비해 대단히 큰 특징을 가지고 있다. 지금까지, 고속의 중이온을 이용하는 이 새로운 분야는 소립자, 원자핵, 원자물리 등의 기초적 연구로부터 의학, 공학, 우주물리학, 고고학, 생물학 등 연구의 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 일본의 경우에도 중이온 가속기 시설의 건설로 「중이온 과학」이라는 새로운 분야가 개척되고 있으며 현재 이화학연구소 중이온 가속기 시설은 중이온 과학의 종합연구의 산실로서 발돋움하고 있다.

본 고에서는 일본의 중이온 가속기 이용에 대한 개략적인 현황과 중이온 비임의 식물에의 이용과 가능성에 대하여 일본 이화학연구소 링사이크로트론을 중심으로 소개한다.

1. 가속기의 발명에서 이용까지

19세기말(1895) X선과 방사능을 발견함으로써 쾨펜 사진과 방사성 동위원소(이하RI)를 이용한다거나 원자의 구조가 보다 명확해지는 것 등 과학발전을 촉진하게 되었다. RI발견 후 2년 뒤 퀴리부처는 처음으로 천연RI를 화학분리하여 폴로늄과 라듐을 발견하였고, 리더포드는 이 폴로늄에서 발하는 α 선을 이용해 원자핵의 존재를 실증하고 원자핵의 인공변화에 성공하였다. 그러나, 원자핵을 보다 상세히 관찰하거나 충분한 양의 RI를 제조하는데는 천연RI에서 얻어지는 방사선 강도로는 너무 약하기 때문에 하전입자를 핵변환이 가능한 에너지까지 인공적으로 가속하는 장치인 가속기의 필요성이 요청되었고 1930년대 초에 비로소 현재의 가속기의 기원이 된 사이크로트론(로렌스), 월트식 입자가속기 등의 발명이 이루어졌다. 고강도의 양자 및 중성자 비임을 발생시키고자 이들 사이크로트론(이하CT)을 이용하기 위하여 강한 방사능을 가진 인공RI를 제조하게 되었고(1934), 이듬해인 1935년 생물시험으로서 처음으로 RI를 추적자(tracer)로서 사용하였다.

일본의 경우 이화학연구소의 仁科芳雄 박사가 최초로 가속기를 이용한 실험을 하였고, 1933년 콕콕트-월트식 입자가속기를 건설하여 여기서 작성한 인(15P)의 RI가 방사하는 양전자 스펙틀을 측정하였다. 일본 최초의 사이크로트론은 1937년(로렌스 발명후 7년뒤) 仁科박사에 의하여 완성되었다. 이의 완성으로 원자핵 물리, 핵화학, 방사선 생물학에 있어서 개척적인 연구가 시작되었고, 1940년 이 CT에서 발생한 3MeV 중양자에 의해서 제조된 24Na 및 32P의 RI가 일본 최초로 생물대사 연구에 사용되었다. 일본 최초의 CT완성후 仁科박사는 당시 세계최대급의 CT(2호) 건설에 착수하여 완성을(1994)하였으나 연구에 채 사용되기도 전에 일본의 제2차세계대전 패전에 따른 진주군의 명령에 의해 해체되어 동경만에 폐기되었다. 금지령 해제직후 이화학연구소는 제3호 CT를 건설(1952)하여 그중 산소 15는 폐결핵의 진단에 이용되었다. 중이온용 CT(제4호)가 1966년 이화학연구소 和光캠퍼스에 완성됨으로써 종래는 가벼운 양자나 중성자에 한정했던 가속 이온종이 무거운 네온(Ne)원소까지 확대되고 중이온과학이라는 새로운 연구분야가 탄생하게 되었다. 1975년 동 연구소는 세계최대급의 중이온 가속기시설건설에 착수하였고, 그 중심이 되는 가속기가 링사이크로트론(RCT)이다. 이 RCT는 1986년 12월 16일 가동하여 연속중이온비임가속의 성능으로서는 세계최고 수준이다. 1990년에는 일본 처음으로 RI비임의 이용을 시작하였고, 특히 RI비임을 이용하여 세계적인 연구성과를 내고 있다(<표 1> 참조).

최근(1996년) 일본 원자력연구소와 공동으로 효고현에 Spring-8이라 불리우는 방사광시설건설 계획을 마무리(선형가속기 ; 1 GeV, 싱크로트론; 8 GeV)하여 전자비임을 시험가동 중이다. 또한, 현재 일본의 주요 원자핵 연구용 중이온 가속기는 <표 2>와 같다.

<표 1> 이화학연구소 가속기 연구시설의 가속기 및 주변장치 개발과 연구성과

RI 비임시설 발전		연구성과
1986	링사이크로트론 시동	중성자 하로발전(Be Be) 중성자 스킴 발생 고온 원자핵의 방극자 거대 공명의 발견 중이온 비임 수분기 조사면이 처리법에 의한 신 식물 기능의 개발 중성자 과잉핵에 의한 신택융합법 발명 신 동위원소 발견(Ne, Mg, Al, Al)
1989	AVF 사이크로트론 시동	
1990	RI 비임 발생장치 시동	
1992	편극 중양자 이온원 비임 달성	
1996	RI 비임 공정용 초전도 RRC 개발비 인가	
1996	18GHz ECR 이온원 달성 bio cross-talk 기능연구 예산 인가	

<표 2> 일본의 원자핵 연구용 중이온 가속기

설치장소	기종	주사용목적
이화학연구소 원자력연구소 원자력연구소 방사선 의학연구소 한다이 핵물리연구소 동경대, 동북대, 구주대 쓰쿠바대, 오오사카대	링사이크로트론 중성자 사이크로트론 중성자 단면 가속기 중이온 싱크로트론 링사이크로트론 ..	중이온 과학 종합연구 마이오, 재료연구 초전도 루스터 기초연구 암 치료 기초연구 기초연구 기초연구

2. 중이온 비임의 식물에의 이용

1) 중이온비임은 다양한 변이체를 산출하는 강력한 도구

현재 필자가 소속된 연구실에서는 중이온 비임을 이용한 바이오크로스토크(bio cross-talk)기능연구가 진행 중이며 이 프로그램은 가속기 시설연구의 일환으로 예산에 편성(1996)되어 추진되고 있다(<표 1> 참조). 진행 과정은 중이온 비임의 제조사조건과 중이온비임에 대한 식물체의 반응을 검토·분석하고, 유용변이체를 찾고 해석하며, 세포 소기관 간의 상호교신을 차단하여 지금까지 밝히지 못한 식물의 기능을 해석하는 것이다.

【식물수분기에 있어 중이온 조사(irradiation)의 효과: 제1단계】

돌연변이 유발방법으로는 X선, 감마선, 중성자선, 입자선 등의 에너지 조사처리법이나 알킬화제나 핵산염기 아날로그 등의 화학물질처리법, transposon이나 T-DNA를 이용한 유전자 돌연변이 유도법 등이 있다. 식물의 돌연변이 유발은 품종개량 등 육종학적 측면 뿐만 아니라 분자생물학 등의 진보와 더불어 식물의 기능이나 유전자를 해석하는 강력한 수단으로써 그 중요성이 증대되고 있다. 효율이 높은 변이체를 얻기 위하여는 피조사체의 기관부위, 중이온의 핵종, 선량, 수분후의 조사시간 등이 큰 요인으로 작용한다. 본 연구그룹에서는 고에너지원으로서 수중에서 비산 거리가 길어 진공이 아닌 공기 중에서도 생체에 조사가 용이하고 큰 영향을 생체에 부여하는 중이온비임을 조사하여 고빈도의 변이체를 작성하게 되었다. 특히 담배의 경우 수분직후의 배(embryo)세포를 이용하면 변이원처리 당대인 M0식물의 꽃에 약 2000~2500M₁ 개의 배가 있기 때문에 이론적으로는 같은 수 만큼의 다양한 변이를 지닌 M1 종자를 얻을수 있다. 따라서 변이가 형태로 나타나는 것이나 우성형질의 경우는 M1 종자에서 발아한 M1 식물을 선발하는 것이 가능하다. 또한, 열성형질은 교배에 의하여 유전형질(genotype)을 동질화시켜 후대에서 형질을 발현시킴으로써 목적하는 형질을 선발할 수 있다. 이와같은

배경하에 담배의 배세포에 중이온 비임조사를 실시하여 형태이상, 염색체 결손 등을 관찰하여 처리시기 및 조사강도의 최적화를 꾀했다. RCT에서 14N(135MeV/u) 및 20Ne(135MeV/u)비임을 조사하여 1개월후에 종자를 수확하여 배지에 치상한 후 형태이상을 관찰하였다.

동시에 알킬화제인 EMS 돌연변이 원을 처리하여 중이온 비임처리와 비교한 결과, 중이온비임 처리시 유모에 있어서 알비노, 박엽, 반점 등의 염색체 손상 개체나 세엽, 권엽, 측아 다발생체, 화색 이상체 등이 다수 나타났으며 EMS처리 보다 월등히 높은 변이체 형성을 나타내었다. 형태 이상체의 출현에 있어서는 BY-4품종은 수분후 처리시기에 따른 명확한 차이는 보이지 않았으나 Xanthi는 14N와 20Ne비임 조사시 수분후 36~48시간에 조사할 경우 변이체가 높게 출현하였다. 현재 이들 중이온 비임 조사체 유전자 수준에서 어떤 변화가 일어났는지에 대한 유전자 결손양식이 해석 중에 있다.

2) 자연계에 없는 유용한 식물을 찾아서

【목적하는 형질을 가진 변이체의 선발: 제2단계】

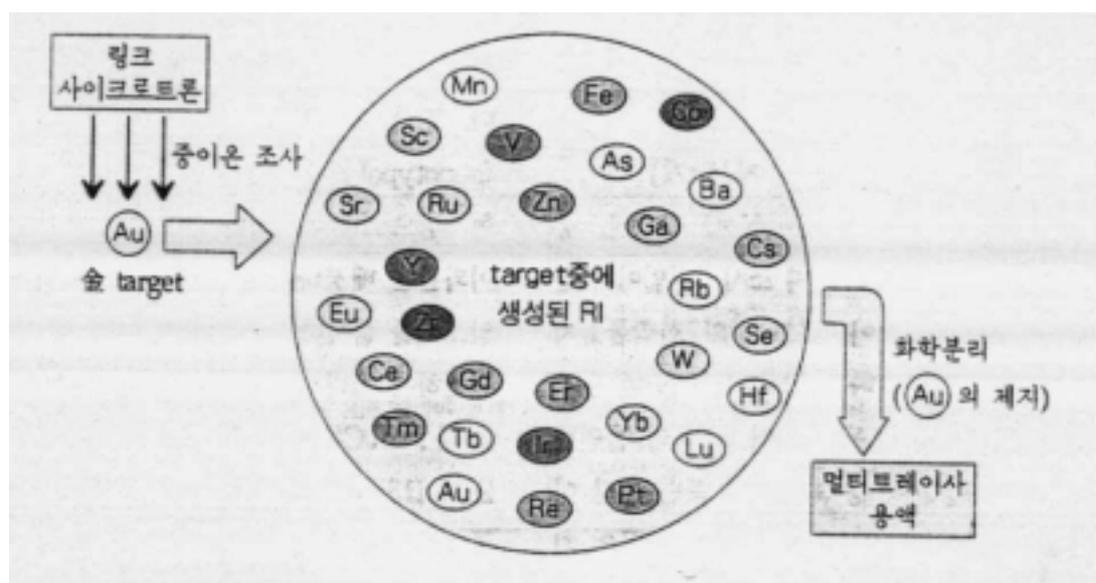
① 내염성 식물체의 선발

전술한 바와같이 중이온 비임은 다양한 변이체를 고빈도로 유도하는 효율적인 돌연변이 유발원으로서 상기방법으로 다양한 변이체를 획득할 수 있었다. 그러나 보다 구체적으로 식물의 기능 해석에 적용하기 위해서는 특정한 형질을 선발할 필요가 있다. 즉, 다양한 돌연변이체 집단으로부터 특정한 식물의 기능을 해석하고자 내염성, 식물호르몬 내성주, 약제저항성주 등을 선발함으로써 목표로 하는 식물기능해석에 접근하게 된다. 본 그룹에서도 식물의 환경 적응성의 기작을 구명하는 일환으로 내염성을 목적형질로 중이온 비임을 조사한 종자를 이용하여 종자수준에서 2단계의 강선발로 그 후대를 육성 중에 있고 내염성에 대한 생리기구(이온 항상성, 삼투압 조절) 및 유전양식, 삼투압 조절 기능에 관계하는 유전자의 발현에 대한 해석을 추진하고 있다.

② 하얀 식물체를 만드는 녹색의 식물

특히, 필자는 내염성 선발 라인의 한 계통으로부터 녹색체와 알비노체가 13:3으로 분리되

<그림 1> 알비노 식물체와 녹색 식물체



는 개체를 발견하였다(<그림 1>참조). 이는 종래의 배양과정이나 돌연변이원을 처리할 때 개체수준에서 가끔 나타나 고사하는 백색체와는 달리 녹색의 식물체로부터 알비노체를 언제든지 만들어 낼 수 있는 황금달걀을

날은 암황과 같아서 안정적으로 개체의 유지가 가능하다. 정상의 녹색 식물체와 상호교잡을 실시한 결과 후대에서 모두 녹색을 나타내어 모성유전이 아닌 핵의 지배에 의해 유전되는 것이 밝혀졌다. 유전해석은 다음 세대 개체를 이용하여 계속 진행 중에 있다. 이와같이 개체의 유지가 가능한 알비노체는 광합성연구의 귀중한 재료로서 본 연구 그룹에서도 이 알비노 현상을 다각도로 해석하고 있다. 지금까지 검토결과, 알비노체는 광합성 기능이 상실되어 탄소원이 공급되어야만 생존이 가능하고 엽록소가 생성되지 않으며, 정상식물체와는 달리 잎에 기공이 다수 발달하고 특히 잎의 표면 조직에까지 다수 기공이 관찰되었다. 한편, 광합성관련 기관의 초현미경적 조사결과 엽록체가 발달되지 않아 틸라코이드막의 발달이 전혀 이루어지지 않았고, 광합성관련 단백질(Rubisco L/S, PSII D1)의 발현도 이루어지지 않았다. 또한 알비노체가 발견된 동일 내염성 선발 라인의 후대에서 한 개체는 잎, 줄기, 꽃받침 등에 흰부분이 들어있는 식물체로 키메라일 가능성에 대하여 분석 중이다. 이와같은 중이온 비임 조사로 획득한 종자는 유전자의 여러 부위가 결손되었을 가능성이 높은 반면, 돌연변이 은행이라 할 만큼 다량의 유전자원을 보유하고 있어서 선발에 의해서 특정한 기능이 결손된 변이체를 안정적으로 획득할 수 있다. 따라서 이들 중이온 비임 조사 종자는 특정한 식물기능을 효과적으로 연구할 수 있는 유전자원이라고 사료된다.

3) 식물체내 각 소기관 간에 교신하는 암호를 풀자

【중이온 micro 비임에 대한 bio cross-talk 연구: 제3단계】

생명은 세포내 소기관 간이나 조직간에 유전자의 지령에 의한 교신(cross-talk)으로 운영되고 있다. 전술한 바와 같이 중이온 비임조사에 의하여 획득된 종자는 무한한 유전자원의 보고임에는 틀림이 없으나 목표로하는 식물의 기능을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 식물체의 세포소기관이나 세포수준에서 비임을 조사하지 않으면 안된다. 이와같이 바이오크로스토크 기능연구의 최종목적은 식물체의 기능단위인 세포 또는 세포소기관의 cross-talk기능을 고에너지 중이온 마이크로 비임으로 제어하여 이들간의 상호작용 내지는 교신을 밝히는 것이다. 예를들면 식물의 분화전능성(또는 분화 발생의 문제) 문제의 경우, 식물 세포내의 핵, 엽록체, 미토콘드리아 등의 세포 소기관 간의 다양한 상호교신을 중이온 마이크로 비임조작으로 차단함으로써 기관분야에 관여하는 크로스토크 기능을 밝힐 수 있고, 자연계에는 존재하지 않는 세포를 작성하는 것이 가능해져 새로운 기능을 갖는 식물체의 작성이 기대된다. 또한, 식물은 광, 중력, 수분 등 환경의 자극에 의해 굴성이라는 다양한 운동을 한다. 굴성운동의 경우에도 조직, 세포간의 상호교신이 일어나고 있기 때문에 마이크로 비임으로 그 교신기능을 파괴하면 알지 못했던 상호교신의 전달기구가 밝혀질 것이다. 이와같이 중이온 비임 조사 기법을 이용하면 아직 밝혀지지 않는 식물기능의 신비를 가시화 할 수 있다. 이 프로그램은 동물 연구 그룹에 의해 동물세포에 있어서 세포간의 cross-talk, 신경조직간의 cross-talk 연구와 함께 진행중이다. 이를 위해서 RCT 연구실의 중이온 마이크로 비임생성 연구 그룹이 참여하여 실험장치 및 조사의 물리적 조건 등을 개발 지원해 주고 있다.

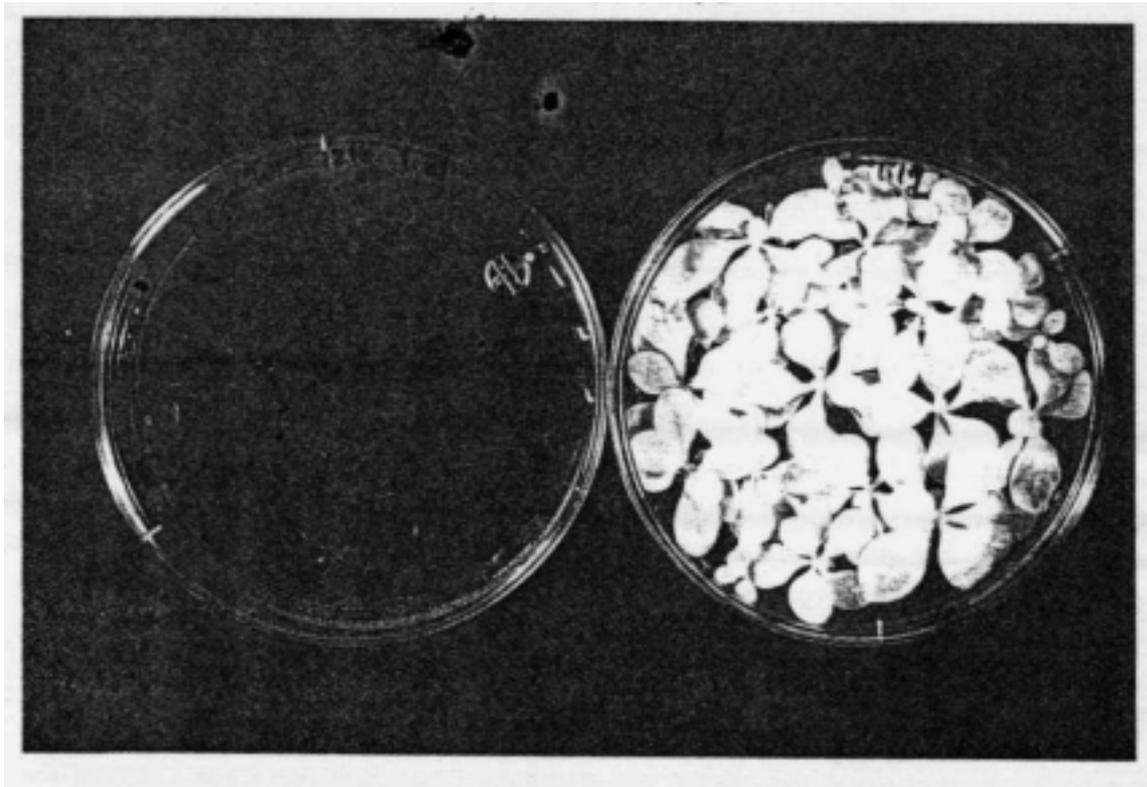
4. Multi-razer의 이용

Multi-razer 법은 이화학연구소 핵화학 연구그룹이 개발하였고 토양의 흡착평형에 대한 산성강우의 영향 등 환경연구, 생체의 미량 원소연구, 식물의 미량 원소의 이행, 분포연구 등 그 범위가 다양하다.

1) multi-razer의 제조; 이화학연구소의 RCT에서 가속된 핵자당 100MeV이상의 중이온으로 조사하면 target 중의 원자핵과 가속된 중이온의 핵이 접촉한 부분이 파괴되는 fragmentation반응이라고 불리우는 핵반응이 일어난다. 이 때 양쪽 핵의 남은 부분은 많은 경우 불안정 핵, 다시 말해 RI가 된다. 그리고 target핵과 가속이온 핵의 접촉은 다양하기 때문에 다양한 RI가 생성된다. target로서 금, 은, 티탄을, 중이온으로는 135MeV/핵자의 탄소, 질소, 산소이온을 사용하고 조사후 target를 적당한 산에 용해하고, 유해 target물질을 화학적으로 제거하면 다수의 각 RI의 안정 동위체를 함유한 multi-razer용액이 만들어진다(<그림 2>참조)

2) 식물체의 응용: 멀티레이저를 이용한 식물체에 있어 각종원소의 흡수, 식물체내의 이행, 분포를 연구할 경우 멀티레이저 액을 식물

<그림 2> 멀티 레이저의 창출



용 배양액에 가해 수경 또는 토양에 넣어 버, 대두 등이 생육할 때 뿌리, 잎, 줄기 종자 등 각 부위의 감마선 스펙트를 측정함으로써 식물체에 있어 미량원소의 보다 명확한 역할을 해명할 수 있고 생육전환기에 이동, 분포를 조사하면 식물의 생육과 관련된 생리 대사적 측면에서 흥미있는 결과가 기대된다. 예를 들어 대두에 멀티레이저를 응용한 결과, Zn, Se, Sr, Ag 등 다수의 방사성 동위원소가 식물체의 어느 부위에 어느 정도 분량, 흡수 되었는지를 알 수 있다.

이 방법은 비파괴적인 방법이고, 동시에 다 종류의 RI를 발생시켜 대상체에 주입하는 방법이므로 단일 추적자를 이용할 경우에 비해 동일한 조건 하에서 다종류의 원소를 추적자로 사용하여 미량원소의 해석이 가능한 방법이다.

3. 금후의 전망

중이온 비임은 지금까지 원자물리, 원자핵물리, 우주물리분야, 핵화학, 의학, 공학, 고고학 등에 주로 사용되어 왔으나 생물 특히 식물분야에서도 그 이용 가능성이 크게 기대되고 있다. 식물분야에서의 이용을 시도한 것 자체가 새로운 일이며, 현재 돌연변이 유발의 효율성이 인정되어 다양한 식물을 대상으로 이용자가 증가하고 있으며 산업적 이용 가치도 높아지고 있다. 여타 분야에 비하면 이제 시작에 불과한 실정이지만 나날이 이용 기술은 개발 진전되고 있다. 아울러 중이온 비임을 식물연구에 적용하기 위해서는 기초적인 자료들이 축적되어야 한다. 또한 중이온 비임 조사식물체의 해석과 비임조사법의 개발도 병행되어야 한다. 특히 마이크로 비임과 같은 가속시 시설을 설계하는 연구진과의 유기적 협조 여부가 연구의 성패를 좌우한다. 양질의 실험장치는 그만큼 좋은 결과를 산출할 수 있다는 것이 그간의 교훈이다. 이와같은 관점에서 아직 해결해야할 과제는 많지만 중이온 비임은 식물의 생명현상을 새로운 각도에서 해석할 수 있는 획기적인 수단임에 틀림이 없다.

【참고문헌】

1. 이화학연구소, 이연링사이크로트론 10주년 기념지: 이화학연구소 가속기 연구시설, 1996. 11. 30.
2. 山口 彦之, 放射線生物學 豪華房, 1995. 12. 10.
3. 松岡 祥分, 辻井博彦, 중립자선 치료, 放射線과 産業(71), pp.18-23.
4. 阿部知子, 吉田茂男, 식물 受粉期에 있어서 중립자 조사의 효과, 1996.
5. T. Abe, C.H. Bae and S. Toshida, "An Effective Mutation Method for Plants using Heavy-ion Beams," RIKEN Accel. Prog. Rep., Vol.30, p.127.

주석 1) 일본 이화학연구소 생물학 박사, 과학기술청(STA) fellow(Tel: 81-48-467-9525)