

PAUL SCHERRER ENSTİTÜSÜ VE MEGAPIE (ADS) UYGULAMASI

Pehlül Serkan BİLGİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2006

ANKARA

Pehlül Serkan BİLGİN tarafından PAUL SCHERRER ENSTİTÜSÜ VE MEGAPIE (ADS) UYGULAMASI adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Saleh SULTANSOY
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile FİZİK anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ömer Yavaş
Üye : Prof. Dr. Saleh Sultansoy
Üye : Prof. Dr. Abbas Kenan Çiftçi
Üye : Prof. Dr. Ergün Kasap
Üye : Yrd. Doç. Dr. Eyyup Tel
Tarih : 28.09.2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Pehlül Serkan Bilgin

PAUL SCHERRER ENSTİTÜSÜ VE MEGAPIE (ADS) UYGULAMASI**(Yüksek Lisans Tezi)****Pehlül Serkan BİLGİN****GAZİ ÜNİVERSİTESİ****FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****Eylül 2006****ÖZET**

Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi çerçevesinde GeV enerjili proton hızlandırıcılarına örnek olmak amacıyla dünyanın önde gelen hızlandırıcı merkezlerinden Paul Scherrer Institute (PSI) incelenmiştir. PSI'nin proton hızlandırıcıları, ikincil demetleri, deney istasyonları tanıtılmıştır. Ayrıca PSI'nin Accelerator Driven System (ADS)'e yönelik hazırlanan MEGAPIE projesi incelenmiştir.

Bilim Kodu : 221.1.149**Anahtar Kelimeler : PSI, proton siklotronu, N-bölgesi, ADS****Sayfa Adedi : 65****Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Saleh Sultansoy**

PAUL SCHERRER ENSTİTÜTE AND MEGAPIE (ADS) APPLICATION**(M.S.c. Thesis)****Pehlül Serkan BİLGİN****GAZİ UNİVERSTY****INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY****September 2006****ABSTRACT**

In this thesis, the Paul Scherrer Institute (PSI), one of the leading accelerator centers in the world, is analyzed keeping in mind the GeV energy proton accelerator proposed on the framework of Turkic Accelerator Complex Project. PSI's proton accelerators, secondary beams and experimental stations have been considered. Details of the PSI's MEGAPIE Project, operating in the framework of Accelerator Driven Systems (ADS), are presented.

Science code : 221.1.149**Key words : PSI, proton cyclotron, N-arena, ADS****Page number: 65****Advisor : Prof. Dr. Saleh Sultansoy**

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Saleh SULTANSOY'a yine kıymetli desteklerini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Abbas Kenan ÇİFTÇİ, Prof. Dr. Ömer Yavaş, Yrd. Doç. Dr. Metin YILMAZ ve Yrd. Doç. Dr. Eyyup TEL'e teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tez DPT'002K120250 nolu " Türk Hızlandırıcı Kompleksi Genel Tasarımı" isimli DPT projesi tarafından kısmen desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. HIZLANDIRICILARA GENEL BAKIŞ	4
2.1. Lineer Hızlandırıcıları (Linac)	4
2.2. Siklotron Hızlandırıcısı	5
2.3. Sinkrotron Hızlandırıcısı	6
3. PAUL SCHERRER ENSTİTÜSÜ (PSI)	8
3.1. Paul Scherrer (1890-1969)	8
3.2. PSI'nin Organizasyon Yapısı	8
3.2.1. Işınım (LSY) ve Mikro-Nanoteknoloji (LMN) araştırmaları bölümü.....	9

Sayfa

3.2.2. Nötron ve Müonlarla Katıhal araştırmaları bölümü (NUM).....	9
3.2.3. Parçacıklar ve madde araştırmaları bölümü (TEM).....	10
3.2.4. Yaşam bilimleri araştırmaları bölümü (BIO).....	11
3.2.5. Nükleer enerji ve güvenliği araştırmaları bölümü (NES).....	12
3.2.6. Genel enerji araştırmaları bölümü (ENE).....	12
3.2.7. Büyük uygulama araştırmaları bölümü (GFA).....	13
3.3. PSI'daki Proton Hızlandırıcıları	13
3.3.1. 870 keV'lik Cockcroft-Walton (DC) iyon kaynağı.....	15
3.3.2. 72 MeV'lik injektör 2.....	15
3.3.3. İnjektör 1 (Phillips Siklotronu).....	16
3.3.4. 590 MeV enerjili dairesel hızlandırıcı	17
3.4. PSI'daki İkincil Demetler	21
3.4.1. piM1 demet hattı	22
3.4.2. piM3 demet hattı	25
3.4.3. piE1 demet hattı	26
3.4.4. piE3 demet hattı	28
3.4.5. piE5 demet hattı	31
3.4.6. µE1 demet hattı	33
3.4.7. µE4 demet hattı	35

Sayfa

3.4.8. SİNQ hedef istasyonu	38
4. HIZLANDIRICI SÜRÜMLÜ SİSTEM.....	42
4.1. Hızlandırıcılar Nükleer Enerjiye Nasıl Yardım Edebilirler.....	43
4.2. Nasıl Bir Hızlandırıcı Olmalı.....	45
4.3. Enerji Yükselteci : Temel Kavram	48
5. PSI'DAKİ MEGAPIE PROJESİ.....	54
5.1. PSI'da Sınır Şartları Ve Fırsatlar.....	57
5.2. SinQ Spallasyon Nötron Kaynağı ve Yardımcı Donanımlar.....	58
5.3. ATEC Aktif İşleme Alanı	58
5.4. Sınır Koşulları	59
5.5. Termal Hidrolik	60
5.6. Proton Demeti	60
5.7. Nötronik	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
7. KAYNAKLAR.....	63
8. ÖZGEÇMİŞ.....	65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. π M1 demet hattının özellikleri.....	23
Çizelge 3.2. π E1 demet hattının özellikleri	27
Çizelge 3.3. π E3 demet hattının akromatik moddaki özellikleri.....	29
Çizelge 3.4. π E3 demet hattının kromatik moddaki özellikleri.....	30
Çizelge 3.5. π E5 demet hattının özellikleri.....	31
Çizelge 3.6. μ E1 demet hattının özellikleri.....	34
Çizelge 3.7. μ E4 Demet hattının özellikleri.....	36
Çizelge 5.1. MEGAPIE projesinin fazları ve yol haritası.....	59
Çizelge 5.2. Soğutma devresinin parametreleri.....	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Proton sinkrotronu kompleksinin genel görünümü.....	3
Şekil 2.1. Dünya çapındaki proton hızlandırıcılarının güç grafiği.....	7
Şekil 3.1. PSI'daki hızlandırıcılar.....	14
Şekil 3.2. PSI'daki deney istasyonları ve proton hızlandırıcıları.....	20
Şekil 3.3. PSI'daki ikincil demetler.....	21
Şekil 3.4. piM1'deki pion akısı	23
Şekil 3.5. piM1 demet hattının mığnetleri	24
Şekil 3.6. piM3'deki müon ve pozitron akısı.....	25
Şekil 3.7. piE1 demet hattının mığnetleri.....	27
Şekil 3.8. piE1 demet hattının A ve B modlarda oluşan pion grafiği.....	27
Şekil 3.9. piE3 akromatik mod da pozitif müon akısı.	28
Şekil 3.10. Akromatik mod da pozitif iyon akısı.....	30
Şekil 3.11. piE3 demet hattının mığnetleri.....	31
Şekil 3.12. piE5 demet hattının mığnetleri.....	32
Şekil 3.13. piE5'deki pion ve müon akıları.....	33
Şekil 3.14. müE1 demet hattının mığnetleri.....	35
Şekil 3.15. müE4 demet hattının mığnetleri.....	37

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. müE4'deki negatif müon akısı.....	38
Şekil 3.17. SinQ'daki deney istasyonları.....	39
Şekil 3.18. SinQ deney hatlarındaki nötron akıları.....	39
Şekil 4.1. Gerçek üniteler için Radyoktoksisite indeksi	44
Şekil 4.2. Tasarlanan proton hızlandırıcısı.....	47
Şekil4.3. Nükleer Transmutasyonun içeriği	49
Şekil 4.4. Tasarlanan reaktör kabının şeması.....	52
Şekil 4.5. Batı Dünyasında (Amerika ve Avrupa) biriktirilmiş kirliliği plütonyum atığının zamana bağlı olarak 3 farklı senaryosu	53
Şekil 5.1. MEGAPIE'nin genel görünümü	55
Şekil 5.2. MEGAPIE'nin üç boyutlu görünümü.....	61

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Yeni bir teknikle PSI'da üretilen X-ray lens.....	9
Resim 3.2. Müonlarla yapılan katı hal fiziği çalışması.....	10
Resim 3.3. PSI'da parçacık fiziği ve astronomi için geliştirilen dedektörler.....	11
Resim 3.4. PSI'da yapılan proton terapi geliştirme deneyleri.....	11
Resim 3.5. Reaktör araştırmaları.....	12
Resim 3.6. PSI'da geliştirilen güneş panelleri.....	13
Resim 3.7. 870 keV'lik Cockroft-Walton (DC) iyon kaynağı.....	15
Resim 3.8. 72 MeV'lik İnjektör 2.....	16
Resim 3.9. 72 MeV'lik injektör 1.....	17
Resim 3.10. 590 MeV enerjili dairesel hızlandırıcı.....	19

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve açıklamaları ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Simgeler	Açıklama
W	Bozon
Z⁰	Bozon
DC	Doğru Akım
I	Akım
AVF	Azimutal Alan
TAC	Turkic Accelerator Complex
PSI	Paul Scherrer Enstitüsü
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
keV	Kilo elektronvolt
MeV	Mega elektronvolt
GeV	Giga elektronvolt
mA	Miliamper
MW	MegaWatt
Q*****	Kuadropol Mağnet
A*****	Eğici Mağnet
S*****	Ayırıcı Mağnet

1. GİRİŞ

Yüksek enerji fiziği, maddenin temel yapısını ve parçacıklar arasındaki etkileşmeleri araştıran bir bilim dalıdır. Önceleri maddenin temel yapı taşının atom olduğu sanılırdı. 'Atom' kelimesi eski yunan literatüründeki parçalanamayan anlamına gelen 'atomos' kelimesinden gelir. Fakat 20. yüzyıl başlarındaki keşifler, atomun temel bir parçacık olmadığını proton, nötron ve elektron gibi yapı taşlarına sahip olduğunu gösterdi. Rutherford deneyinin başarısı, 1932 yılında Chadwick tarafından nötronun keşfi ve tüm bunlara paralel olarak kuantum mekaniğinin gelişimi atomun yapısını açıklamada şüphesiz büyük rol oynamıştır. Atomun temel yapısının araştırılması bundan sonra genel olarak hızlandırıcı teknolojisi ile yapılacaktır.

İlk hızlandırıcılar 1930'lu yıllarda yapılsa da , yeni parçacıkların keşfi bilinen parçacıklar arasındaki yüksek enerjili çarpışma deneylerine dayanmaktadır. Keşfedilen yeni parçacıklar genel olarak kararsız ve 10^{-6} ile 10^{-23} arasında değişen çok kısa yarı ömre sahiptir. Geçen 30 yıl boyunca, bütün dünyada oldukça güçlü parçacık hızlandırıcıları yapılmış ve bu sayede de kontrollü laboratuvar şartlarında daha şiddetli parçacık çarpışmalarının gözlenmesi mümkün olmuştur. Böylece atom altı parçacıkları daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.1963 yılında Gell-Mann ve George Zweig'in kuark modelini önermesi ve 1967 yılında Abdus Salam ve Steven Weinberg tarafından elektrozayıf modelin önerilmesi ve 1983 yılında W ve Z⁰ zayıf bozonların keşfi standart modelin oluşmasını sağlayan önemli gelişmelerdir. Elektrozayıf teori ve kuantum kromodinamiğinin birleştirilmesinden oluşan standart model, yüksek enerji fiziğindeki önemli teorilerin başında gelir. Standart modelin ötesindeki yeni fizik araştırmaları için ileri düzey hızlandırıcı teknolojileri alanında çalışmalar tüm dünyada devam etmektedir.

21. Yüzyılın 10 jenerik teknolojilerinden biri olan parçacık hızlandırıcıları, temel parçacık fiziğinden moleküler biyolojiye, nükleer fizikten tıpa, izotop üretiminden gıda sterilizasyonuna, enerji üretiminden anjiyografiye, malzeme biliminden savunma sanayine, polimer kimyasından arkeolojiye kadar bilim ve teknolojinin yüzlerce alanında kullanılmaktadır [1]. Türkiye bu teknolojinin oldukça gerisinde kalmış ve hala ülkemizde orta çapta bir hızlandırıcı bulunmamaktadır [2]. 1997

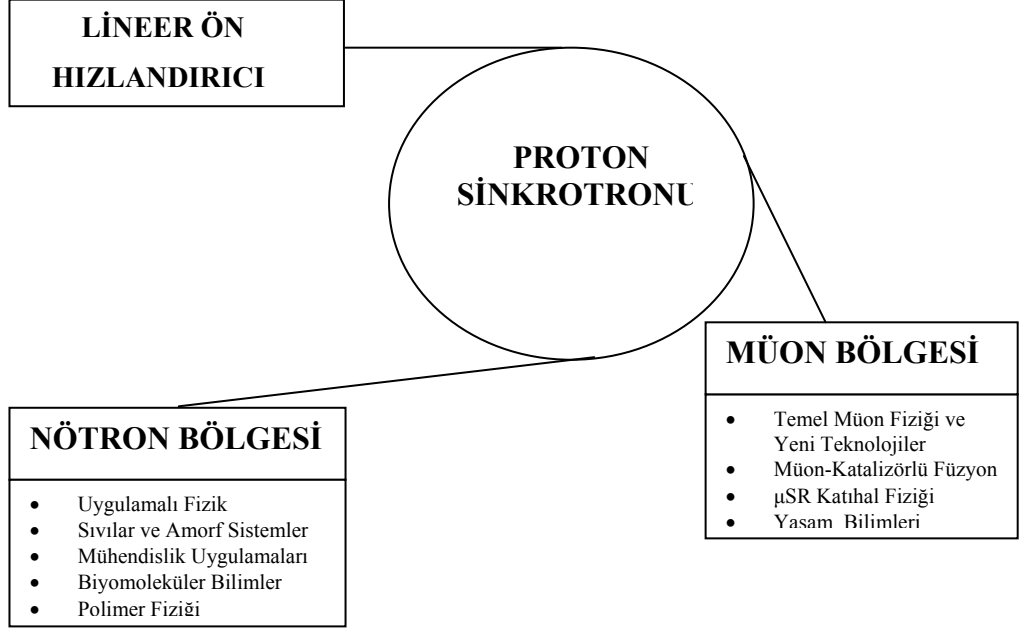
yılında, temel ve uygulamalı araştırmalara imkan sağlayacak orta çaplı bir hızlandırıcı laboratuvarı kurulmasını öngören bir ulusal program DPT desteği ile başlatılmıştır [3].

Türk Hızlandırıcı Kompleksi (TAC) adı altında kurulması planlanan hızlandırıcı laboratuvarı, temelde iki kısımdan oluşacaktır. Birinci kısım, linak halka tipli elektron-pozitron arpıştırıcısıdır. Charm- fabrikası olarak da isimlendirilen bu kısımda, temel ve uygulamalı araştırmaların yapılması planlanmaktadır. İkinci kısım ise enerjisi 1-5 GeV olan yoğun akımlı bir proton demeti üretmeyi amaçlamaktadır. TAC, proton halkasının farklı noktalarından alınan proton demetleriyle oluşturulacak müon ve nötron bölgesi laboratuvarlarında, sırasıyla müon ve nötron ikincil demetlerine dayalı pek çok uygulama ve araştırma yapılabilecektir. Proton hızlandırıcısı tasarımı konusunda son yıllarda Süper Proton Linak'a ilgi artmıştır, TAC projesinde de bu konuda çalışmalar başlamış ve devam etmektedir [4].

Proton sinkrotronu, yapısal olarak lineer ön hızlandırıcı (LINAC) ve proton halkası kısımlarından oluşacaktır. Proton halkasına enjektör görevi yapacak olan lineer hızlandırıcı, H^+ iyonlarını 100-300 MeV'lik enerjiye ulaştıracaktır. H^+ iyonlarının protona dönüşümü ise enjeksiyon bölgesinde gerçekleştirilecektir. Proton sinkrotronu kompleksinin genel şematik görünümü Şekil 1.1.'de verilmiştir.

TAC proton hızlandırıcısının parametrelerini ve uygulamalarını sağlıklı belirlemek için dünyadaki benzer enerji bölgesinde çalışan proton hızlandırıcıları incelenmelidir.

Bu alışmada Paul Scherrer Enstitüsünde proton hızlandırıcısının nötron bölgesindeki Hızlandırıcı Sürümlü Sistem uygulaması hakkında bilgi verilmiştir. Kurulması planlanan Türk Hızlandırıcı Kompleksindeki proton hızlandırıcısının nötron bölgesinde çalışılabilecek konulara örnek olması hedeflenmiştir.



Şekil 1.1. Proton sinkrotronu kompleksinin genel görünümü.

2. HIZLANDIRICILARA GENEL BAKIŞ

Hızlandırıcılar; elektron ve proton gibi yüklü temel parçacıkları, belirli bir amaç çerçevesinde, belirlenen bir enerjiye ulaşıncaya kadar hızlandırılmasını sağlayan aygıtlardır. Hızlandırıcıların tasarımı, hangi amaç için kullanılacaklarına bağlı olarak önemli değişiklik gösterir. Bazı durumlarda yüksek enerji, bazı durumlarda ise yüksek yoğunluk gereklidir. Hızlandırıcılarda elektrik alan, yüklü parçacıkları hızlandırmak için; manyetik alan ise demeti odaklamak ve saptırmak için kullanılır.

1920 yılında yapılan bir fizik konferansında Rutherford, nükleer fizik araştırmalarında kullanılması için parçacık hızlandırıcılarının geliştirilmesini önermiştir. Cockcroft ve Walton, Rutherford'un Cavendish laboratuvarında başarılı bir hızlandırıcı tüp geliştirdiler. İlk çevrimsel hızlandırıcı 1925'te Ising tarafından önerilmiş ve Wideroe bu düşünceyi geliştirerek 1928'de çalışan bir lineer hızlandırıcı inşa etmiştir. Bu hızlandırıcıda civa iyonları radyo-frekans voltajı ile hızlandırılmıştır. 1932 yılında Cockcroft-Walton, proton hızlandırıcısı ile hızlandırılan protonları Li çekirdekleri ile çarpıştırılmıştır. Daha yüksek elektrostatik hızlandırma potansiyelleri ise Van de Graff jeneratörü ile elde edilmiştir. Bu hızlandırıcı ile enerji olarak MeV düzeyine ulaşılmıştır. Yükselen enerjilerde sürüklenme tüplerinin sayısında görülen artış, dairesel hızlandırıcı fikrini ortaya koymuştur.

1940'lı yılların sonlarından başlayarak gelişen teknoloji ile ortalama her yedi yılda bir, hızlandırıcılarla ulaşılan enerjinin üst sınırı on kat artmış ve günümüzde TeV mertebesindeki enerjilere ulaşılmıştır. Çeşitli hızlandırıcı tipleri arasında; linac, siklotron ve sinkrotron dairesel hızlandırıcısı en önemlileridir.

2.1. Lineer Hızlandırıcıları (Linac)

Lineer hızlandırıcılarda, lineer bir tüp içerisine belli sayıda elektrot yerleştirilmiş bir düzeneğe iyonlar enjekte edilir. Elektronların her iki tarafına uygulanan alternatif voltaj uygun şekilde belli aralıklarla sıralanmış elektrotların fazları değiştirilerek hareketlenen iyonların hızlanmaları sağlanır.

1928 yılında R. Widereo tarafından tasarlanan lineer hızlandırıcı ile 50 keV'lik pozitif iyonlar hızlandırılmış ve ikinci dünya savaşından sonra hem elektron hem de proton hızlandırmak için kullanılmıştır. Stanford Üniversitesi'nde bulunan 3 km uzunluğundaki lineer hızlandırıcı, en uzun lineer hızlandırıcı olup elektron veya pozitronu 50 GeV'e kadar hızlandırmaktadır.

2.2. Siklotron Hızlandırıcısı

İyonları MeV mertebesinde hızlandırabilen, en iyi bilinen ve en yaygın kullanılan hızlandırıcılardır. Lineer hızlandırıcılarda olduğu gibi bu hızlandırıcılarda da değişen fazlar yardımıyla iyonlar hızlandırılır. Siklotron hızlandırıcısında demet, manyetik alanın etkisiyle dairesel bir yol izler ve parçacıklar D'ler adı verilen yarım daire şeklindeki metal odalar içinde hareket eder. D'ler arası aralıkta ise parçacıklar hızlandırıcı gerilimin etkisini duyarlar ve her dönüşte küçük bir miktar enerji kazanırlar. Demet spiral bir yörünge çizdiği için yarıçap sabit kalmamaktadır. Siklotron tasarımı fikri, ilk olarak 1929 yılında Ernest Lawrence (Berkeley) tarafından ortaya atılmış ve ilk deneysel siklotron 1931 yılında Berkeley'de M. Stanley Livingston tarafından yapılmıştır. D'ler 12,5 cm yarıçapındaydı ve siklotron 1,3 T alanda 1,2 MeV enerjili protonlar üretebiliyordu. Buna karşılık gelen frekans 20 MHz dolayındaydı.

Görelî hızlarda, demetin hızı olan v değeri artarken rezonans durumunu korumak için B değerini de arttırmak gerekir. Bu yüzden büyük yarıçaplarda manyetik alan daha büyük olmalıdır. Manyetik alan artırıldığı zaman ise istenmeyen bir takım saçılma etkileri oluşmaktadır. Bu problemi aşmak için, sinkrosiklotron adı verilen frekans modülasyonlu siklotronda olduğu gibi değişken birer frekans kullanılabilir. İlk defa 1946'da çalıştırılan Berkeley sinkrosiklotronu en yüksek enerjiye sahip sinkrosiklotronudur. Elde edilen protonların enerjisi 740 MeV ve ortalama demet akım $0,1 \mu A$ 'dir. Aynı boyutlarda diğer önemli iki sinkrosiklotron, Dubna'da ve Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nde (CERN) çalıştırılmaktadır.

Siklotronları yüksek enerjilere ulaştırmak için alternatif bir çözüm; artan yörünge yarıçapı ile birlikte manyetik alanı da artırmak için, manyetik alanı birbirini takip eden yüksek ve düşük değerli bölgelere bölmektir. Burada amaç, manyetik alanın artırılmasıyla dağılan demetin yeniden odaklanmasını sağlamaktır. Bu tür bir siklotrona bölge odaklı veya AVF (azimutal olarak değişen alan) siklotronu denir. AVF siklotronların, sinkrosiklotronlara göre en büyük avantajı sürekli bir demet ve dolayısıyla daha yüksek demet akımları (100 μ A mertebesinde) olanağı sunulmaktadır. İlk AVF siklotronlarından olan ve ilk kez 1961 yılında çalıştırılan Oak Ridge eş zamanlı siklotronu (ORIC), 100 μ A akımla enerjisi 70 Mev değerine ulaşan protonlar üretebilmektedir. Daha büyük bir AVF siklotronu olan TRIUMF, Kanada'da kurulmuştur. 520 MeV'lik protonları üretebilen TRIUMF, protonlarla gerçekleştirilebilen nükleer reaksiyonları araştırmak için tasarlanmıştır.

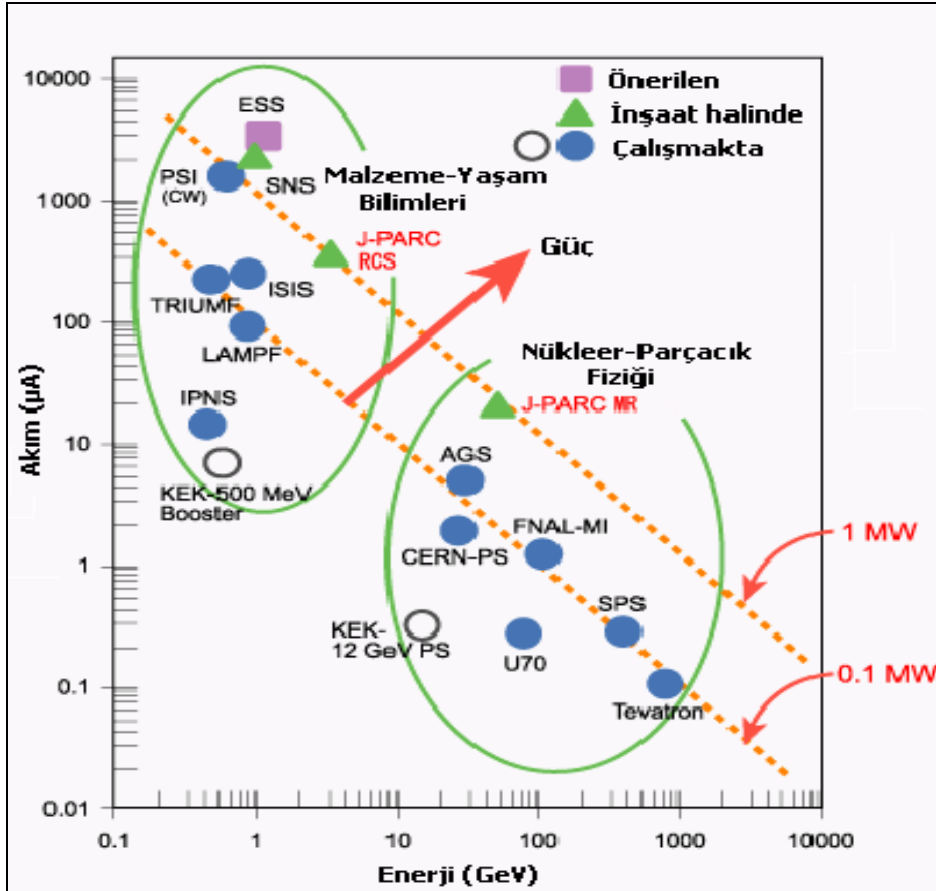
2.3. Sinkrotron Hızlandırıcısı

Siklotron veya sinkrosiklotronların daha yüksek enerjilere çıkartılması daha büyük yarıçaplı makineler inşa etmek anlamına gelir. Kullanılacak mıknatısların büyüklüğü de düşünöldüğünde hızlandırıcının maliyeti oldukça büyük olacaktır. Bunun yerine içerisinde, hem manyetik alan şiddetinin hem de rezonans frekansının değiştirildiği sinkrotron hızlandırıcıları geliştirilmiştir.

Sinkrotron tipli hızlandırıcılarda yarıçap sabit. Parçacıklar dairesel bir yörünge izler ve her yörünge boyunca bir boşluktan geçtikçe bir rezonans elektrik alan tarafından hızlandırılırlar. Enerji arttıkça, rezonansı sürdürmek için, boşluk boyunca ac gerilim frekansı arttırılmalıdır. Eşzamanlı olarak, yarıçapı sabit tutmak için manyetik alan artmalıdır.

İlk proton sinkrotronu, 1952 yılında Brookhaven Ulusal laboratuvarında yapıldı. Kozmotron adı verilen bu aygıt 3 GeV enerjide protonlar üretmek için tasarlanmıştır. Bir rakip proton sinkrotronu aynı yıllarda Berkeley'de Lawrence Radyasyon Laboratuvarı'nda inşa edildi. Yarıçapı ve manyetik alan şiddeti biraz daha büyüktü. Berkeley'deki bu makineye Bevatron adı verildi. Bu makinenin

tasarım enerjisi 6,4 GeV'di. 1950'lerin sonlarında ABD, İngiltere, Fransa ve Sovyetler Birliğinde çeşitli başka geleneksel proton sinkrotronları inşa edilmiştir. Bu makineler 1-10 GeV enerjili protonlar üretmiştir. 1950'lerin sonlarında, proton sinkrotronlarına kuvvetli odaklama prensibini uygulamak için tasarım çalışmaları başladı. 1960'dan itibaren iki makine çalışmaktaydı. Bunlar Brookhaven'deki değişken gradyen sinkrotronu (AGS) ve CERN proton sinkrotronu (CPS) idi. CERN daha büyük ve daha pahalı nükleer hızlandırıcılara çoğu ülkenin tek başına ekonomik olarak erişemeyeceği gerçeğini gören birçok batı Avrupa ülkesinin ortak çabasıyla kurulmuştur. İsviçre Cenevre'de inşa edilen CPS, CERN'deki tesisde ilk büyük hızlandırıcıydı. Bu merkezdeki Süper Proton Sinkrotronu (SPS) ise 400 GeV enerjili protonlar için tasarlanmıştır. Bu tesis yüksek enerji fiziği araştırmaları alanında dünyanın en aktif merkezlerinden biri haline geldi.



Şekil 2.1. Dünya çapındaki proton hızlandırıcılarının güç grafiği.

3. PAUL SCHERRER ENSTİTÜSÜ (PSI)

PSI 1974 yılında çalışmaya başlayan siklotron hızlandırıcısında, şiddetli müon ve pion ikincil demetleri üretmek için 590 MeV enerjili, 2 mA'lık akım oluşturan, 1 MW gücüne sahip ve yüksek yoğunluklu proton demeti elde etmektedir. Dünyadaki en güçlü proton, nötron ve müon demetleri burada bulunmaktadır. Ayrıca 1997 yılından beri kullanılan bir spallasyon nötron kaynağı ilave edilmiştir. Kullanım alanlarına göre dizayn edilmiş laboratuarlarda, çeşitli alanlarda deney ve araştırmalar yapılmaktadır. İzotop üretimi, göz tedavisi ve proton yöntemi gibi yaşam bilimlerinde, nükleer fizik, parçacık fiziği ve katı hal fiziği gibi bilimsel alanlarda ve malzeme bilimi üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Bu laboratuvar yaklaşık 1200 çalışan araştırmacısıyla İsviçre'nin en büyük ulusal enstitüsüdür.

Enjektör halkasına gelen 72 MeV enerjili proton demetinin enjekte edildiği ana proton halkasından, 590 MeV enerjili ve sürekli yapıda proton demeti elde edilir. Proton demetinin, deneysel uygulama ve araştırma laboratuvarlarına ulaşmasını sağlamak için eğici magnet ve kuadropol magnet gibi elektrostatik demet ayırıcıları kullanılmaktadır. 590 MeV enerjili ana proton demet yolu üzerine yerleştirilen böyle bir demet ayırıcısı, demetin bir kısmını proton terapi, nükleer yapı ve malzeme bilimi araştırmaları için M- hedefine (5 mm'lik karbon) ve E- hedefine (60 mm'lik karbon) yönlendirir. Bu hedeflerde pion ve müon üretimi gerçekleşmektedir. Ayrıca bir kısım proton demeti de nötron üretimi için spallasyon nötron kaynağına gönderilir.

3.1. Paul Scherrer (1890-1969)

Paul Scherrer 3 şubat 1890'da St Gallen'de doğdu. Zürih'de olan Swiss Federal Institute of Technology de fizik ve matematik eğitimi aldı. 1946'da İsveç Atom enerjisi komisyonu başkanı oldu.

3.2. PSI'nin Organizasyon Yapısı

Enstitü bir araştırma komisyonu, yönetim bölümü ve buna bağlı insan kaynakları, güvenlik, iletişim, teknoloji transfer bölümleri ayrıca 8 araştırma bölümlerinden oluşmaktadır. Bunlar;

- Sinkrotron Işınımı (LSY) ve Mikro-Nanoteknoloji (LMN) Araştırmaları Bölümü
- Nötron ve Müonlarla katıhal Araştırmaları Bölümü (NUM)
- Parçacıklar ve Madde Araştırmaları bölümü (TEM)
- Yaşam bilimleri Araştırmaları Bölümü (BIO)
- Nükleer Enerji ve Güvenliği Araştırmaları Bölümü (NES)
- Genel Enerji Araştırmaları Bölümü (ENE)
- Büyük Uygulama Araştırmaları Bölümü (GFA)

3.2.1. Sinkrotron ışınımı (LSY) ve Mikro-nanoteknoloji (LMN) araştırmaları bölümü

Bu araştırma bölümü sinkrotron ışınımı araştırmaları yapan gruplar ve mikro- nano teknoloji araştırmaları yapan gruplar olmak üzere ikiye ayrılmıştır.



Resim 3.1. Yeni bir teknikle PSI'da üretilen X-ray lens.

3.2.2. Nötron ve müonlarla katıhal araştırmaları bölümü (NUM)

Bu araştırma bölümü;

- Yoğun madde teorisi
- Nötron saçılması (LNS)
- Spallation Nötron Kaynağı(ASQ)

- Müon Spin Spektroskopisi (LMU)
- Düşük Sıcaklık Uygulamaları

olmak üzere müonlarla ve nötronlarla katıhal araştırmaları yapılmaktadır.



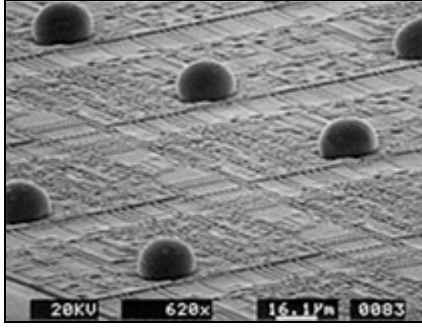
Resim 3.2. Müonlarla yapılan katı hal fiziği çalışması.

3.2.3. Parçacıklar ve madde araştırmaları bölümü (TEM)

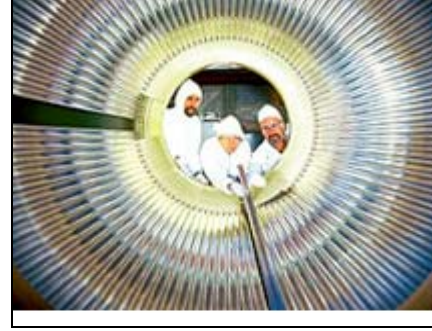
Bu araştırma bölümü;

- Parçacık Fiziği (LTP)
- Astrofizik (LAP)
- Radyokimya(LCH)
- İyon Demeti Fiziği (LIP)

olmak üzere dört alanda çalışmalar yapılmaktadır.



(a)



(b)

Resim 3.3. PSI'da parçacık fiziği ve astronomi için geliştirilen dedektörler. (a), dedektörün μm boyutu. (b), dedektörün içten görünümü.

3.2.4. Yaşam bilimleri araştırmaları bölümü (BIO):

Bu bölümde;

- Radyasyon Tedavisi (ASM)
- Radyasyon İlaçları Bilimleri Merkezi (ZRW)
- Biomoleküler Araştırmalar (LBF)

olmak üzere üç konuda çalışmalar yapılmaktadır.



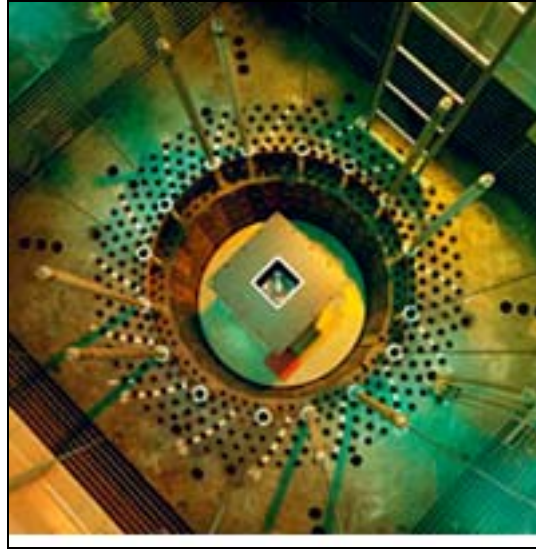
Resim 3.4. PSI'da yapılan proton terapi geliştirme deneyleri.

3.2.5. Nükleer enerji ve güvenliği araştırmaları bölümü (NES)

Bu bölümde;

- Reaktör Fiziği ve Reaktör Sistemlerinin Davranışları (LRS)
- Termal Hidrolikler (LTH)
- Malzemelerin Davranışları (LWV)
- Radyoaktif Atık Yönetimi (LES)

olmak üzere dört konuda çalışmalar yapılmaktadır.



Resim 3.5. Reaktör araştırmaları.

3.2.6. Genel enerji araştırmaları bölümü (ENE)

Bu bölümde;

- Enerji ve Malzeme Dönüşümleri (LSK),
- Güneş Teknolojisi (LST),
- Yanma Araştırmaları (LVF),

- Elektrokimya (LEC),
- Atmosfer Kimyası (LAC)

olmak üzere beş konuda çalışmalar yapılmaktadır.



Resim 3.6. PSI'da geliştirilen güneş panelleri.

3.2.7. Uygulama araştırmaları bölümü (GFA)

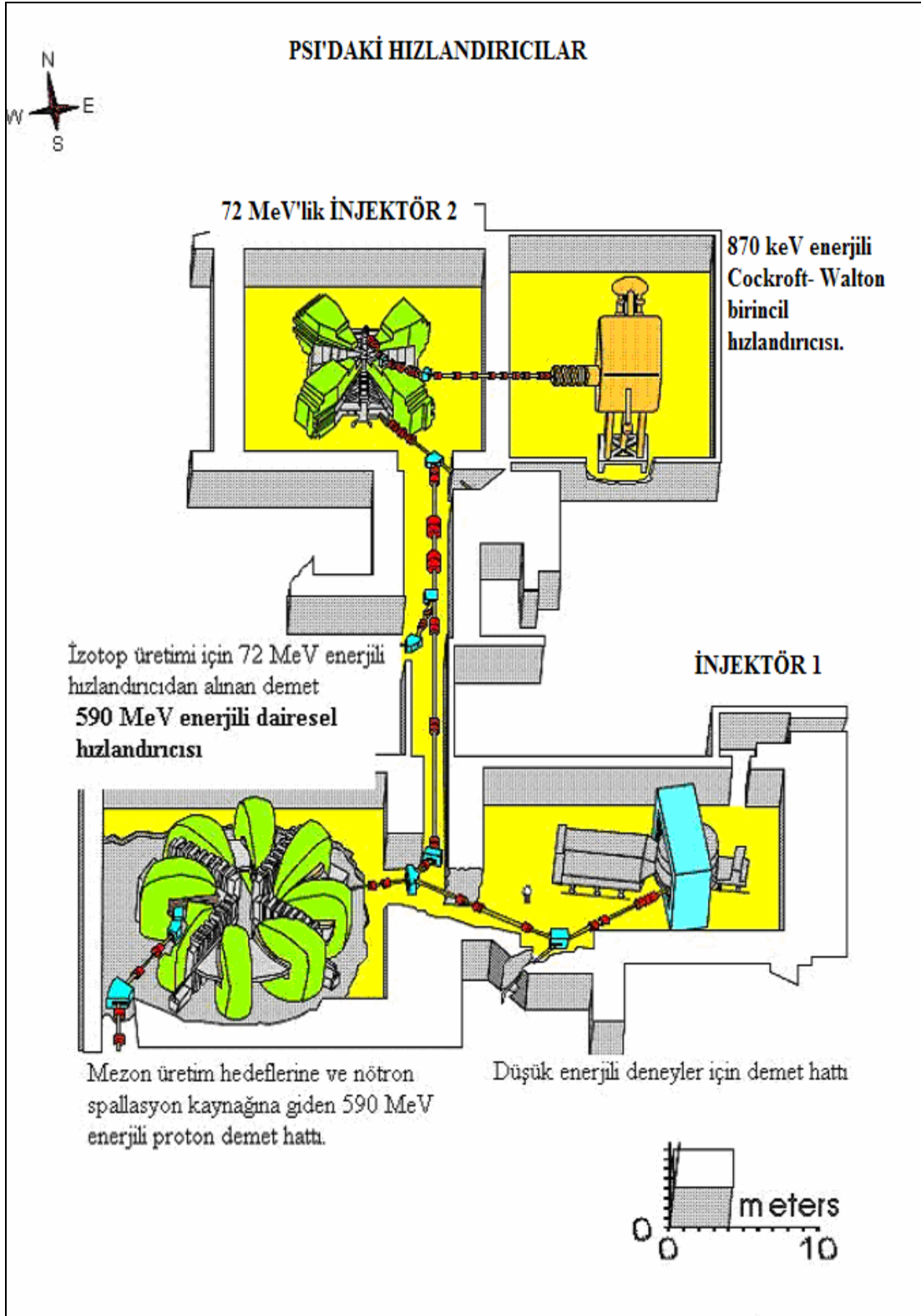
Bu bölümde;

- Hızlandırıcı / Geliştirme ve Çalıştırma (ABK)
- Hızlandırıcı / Uygulamalar ve Sistemler (ABE)
- Teknik Destek / Koordinasyon (ATK)

olmak üzere üç konuda çalışmalar yapılmaktadır.

3.3. PSI'daki Proton Hızlandırıcıları

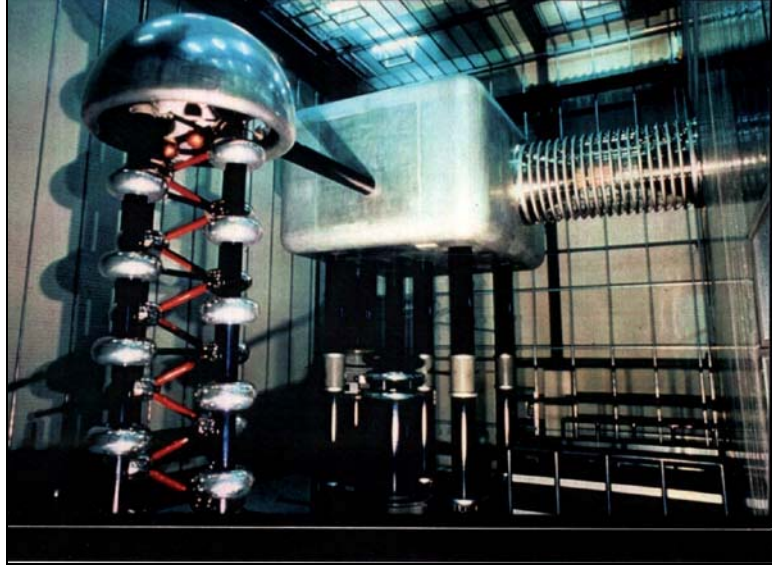
PSI'daki proton hızlandırıcıları injektör-2 için birincil injektör olarak 870 keV'lik Cockcroft-Walton (DC) iyon kaynağı, 72 MeV'lik injektör-2 , 72 MeV'lik injektör-1 ve 590 MeV'lik dairesel hızlandırıcıdan oluşmaktadır. Daha sonra proton demeti ikincil demetleri oluşturmak için M-hedefine ve E-hedefine gönderilmektedir.



Şekil 3.1. PSI'daki hızlandırıcılar.

3.1.1. 870 keV'lik Cockcroft-Walton (DC) iyon kaynağı

İyon kaynağından çıkış enerjisi 60 keV olan protonlar Cockcroft-Walton hızlandırıcısında 810 keV'e kadar hızlandırılırlar.



Resim 3.7. 870 keV'lik Cockcroft-Walton (DC) İyon Kaynağı.

3.3.2. 72 MeV'lik injektör 2

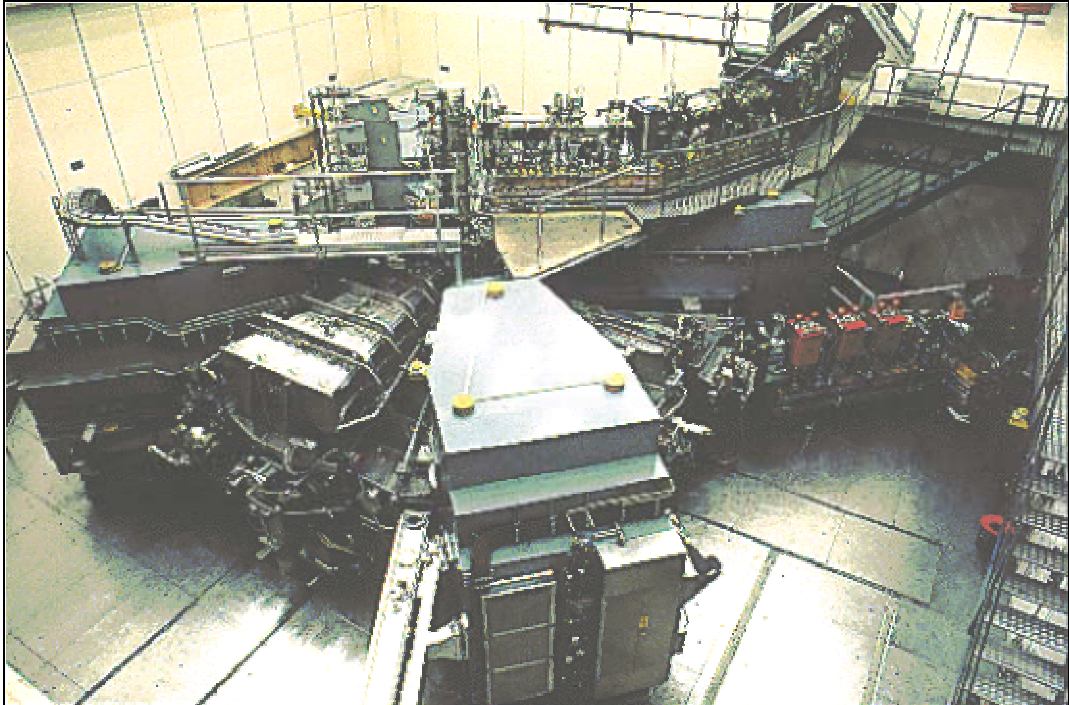
PSI'daki İnjektör 2 siklotronu, Phillips tarafından kurulan çok parçalı, değişken enerjili İnjektör 1 yenilenirken kurulmuştur. Yüksek yoğunluklu, yüksek kalitede 72 MeV enerjili protonları, 590 MeV'lik dairesel siklotrona enjekte etmektedir.

İnjektör 2 dairesel bir siklotronudur. 4 sektör magnetten oluşur, düşük enerjili 870 keV'in altındaki Cockcroft-Walton birincil hızlandırıcısından gelen proton demetlerinin girişi vardır.

Parametreler

- Giriş Enerjisi: 870 keV
- Çıkış Enerjisi: 72 MeV
- Enerji dağılımı (FWHM): 0.2 %

- Demet Emittansı: 2π mm x mrad
- Demet Akımı: 1.85 mA
- Hızlandırıcı Frekansı: 50.63 MHz
- İki Puls Arası: 19.75 ns
- Bunch Uzunluğu: 0.3 ns



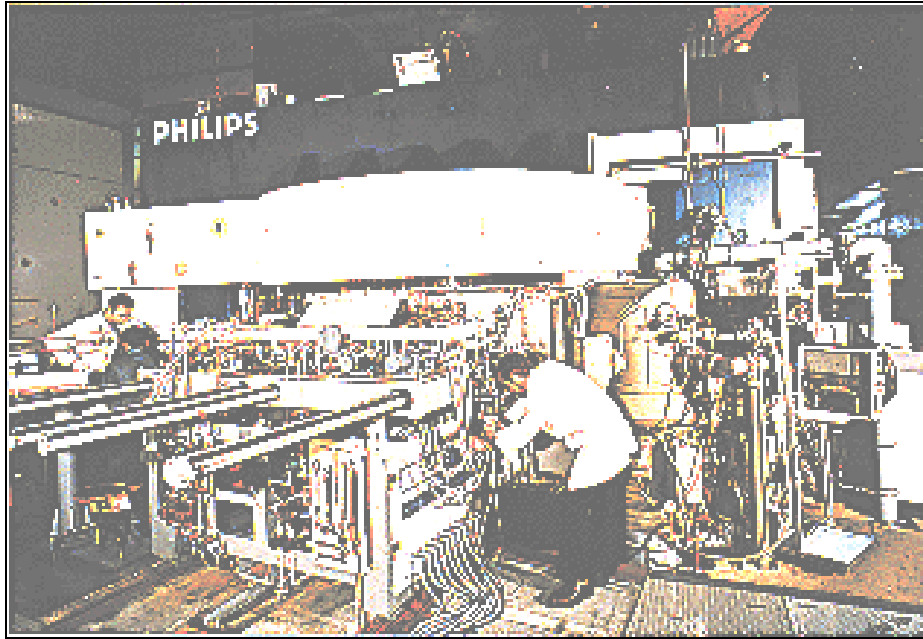
Resim 3.8. 72 MeV'lik İnjektör 2.

3.3.3. İnjektör 1 (Phillips Siklotronu)

İnjektör 1 Alman Phillips firması tarafından üretilen değişken enerjili bir siklotronudur. Hızlandırıcı relativistik enerjilerde düz düşey odaklama için azimutal değişken manyetik alan oluşturan bir manyete sahiptir. Demet enerjisini protonlar için 72 MeV'e ve yükü Z ve kütle numarası A olmak üzere iyonları $120 (Z/A)^2$ MeV'e kadar çıkarır.

Birkaç iyon kaynağıyla donatılmıştır, injektör 1 kullanıcıları ağır iyonlar ve ışıınımdan döteron ve proton demetlerine kadar değişken ve geniş kullanıma sahiptirler. Bir de kutuplanmış proton ve döteron demetleri elde edilebilir.

1994’de kurulan ECR iyon kaynağı ağır iyonları, daha uzun süre hızlandırılmasını sağladı.



Resim 3.9. 72 MeV’lik injektör 1.

3.3.4. 590 MeV enerjili dairesel hızlandırıcı

Çıkış demet enerjisi 590 MeV olan dairesel hızlandırıcı PSI tarafından 1974 yılında çalışmaya başlamıştır.

İnjektör 2 siklotronundan elde edilen 72 MeV’lik protonlar, büyük siklotronun merkezine enjekte edilir ve enjekte edilen protonlar yaklaşık 220 dönmeden sonra maksimum enerjiye ulaşır.

Dizaynı, çok yüksek demet yoğunluğunda çalışmasına izin verecek şekilde 4 büyük yapının ve güçlü RF kaviterince yüksek hızlanma voltajı sağlanır, kavite üçüncü harmonik hızlandırma voltajında çalışması temel alınarak yapılmıştır.

Parametreler

Giriş Enerjisi: 72 MeV

Çıkış Enerjisi: 590 MeV

Çıkış Momentumu: 1.2 GeV/c

Enerji dağılımı (FWHM): 0.2 %

Demet Emittansı : 2π mm x mrad

Demet Akımı: 1.6 mA

Hızlandırıcı Frekansı: 50.63 MHz

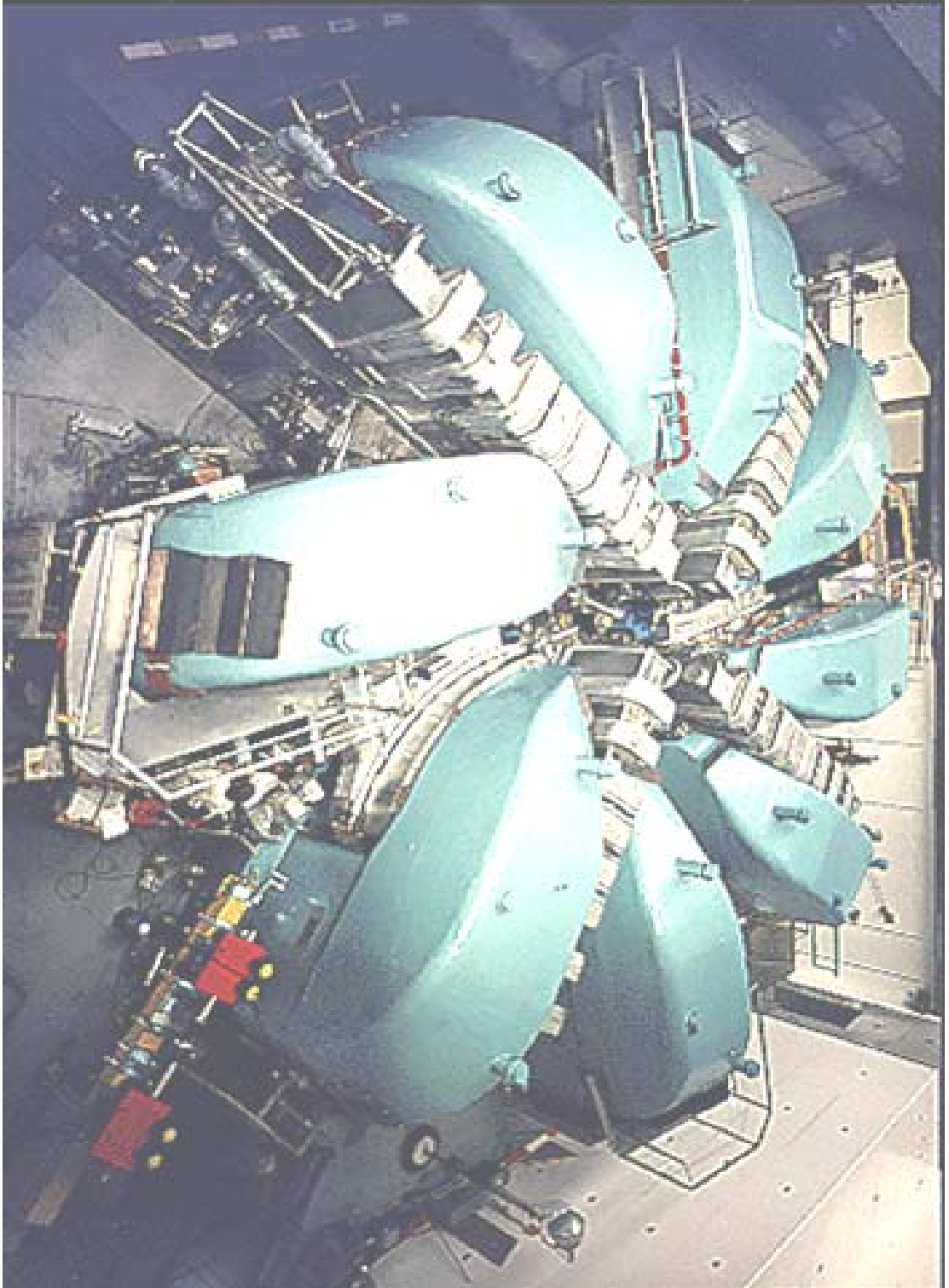
İki Pulse Arası: 19.75 ns

Bunch Uzunluğu: 0.3 ns

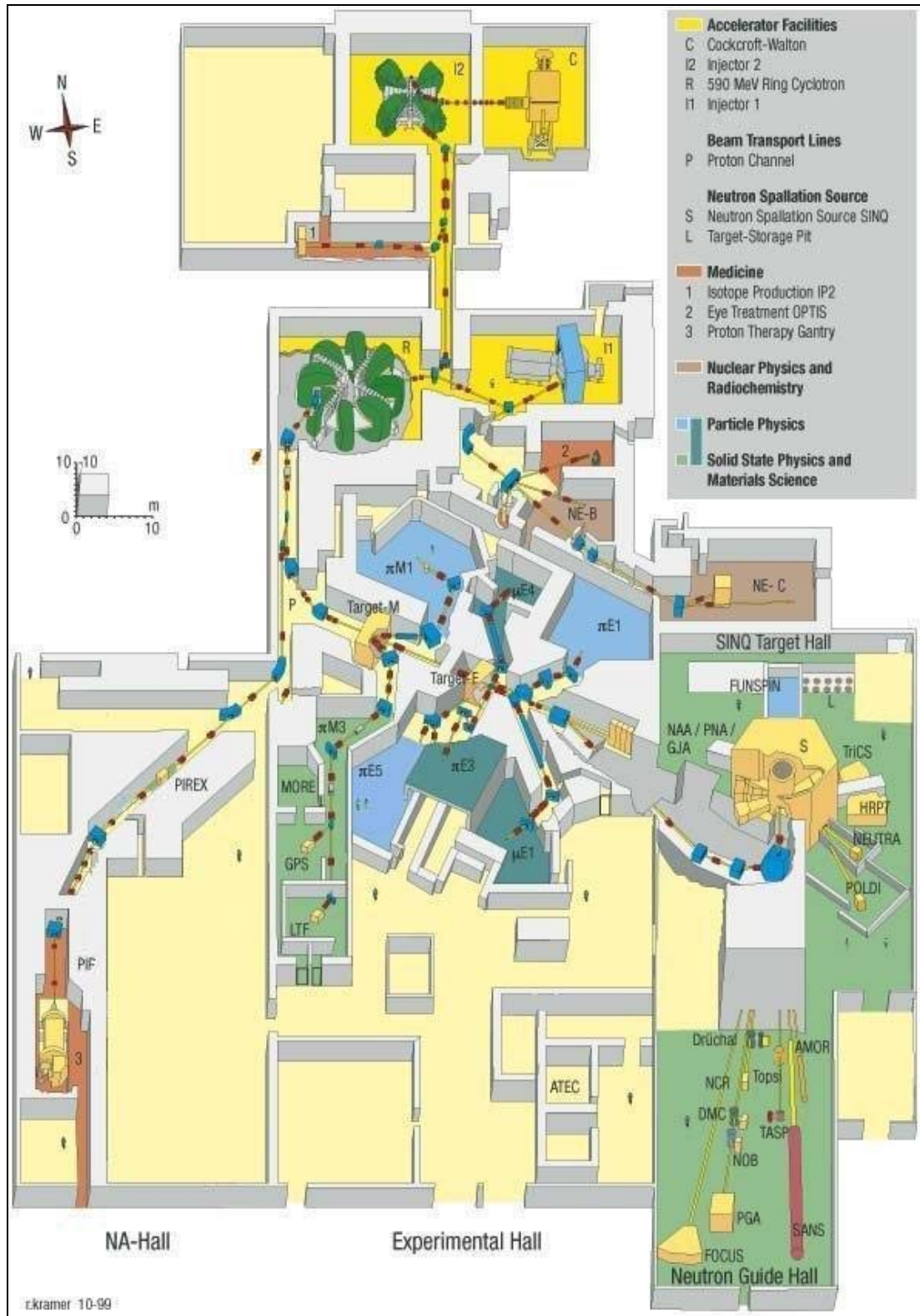
Çıkış Kayıpları: 0.03 %

PSI'da 590 MeV enerjili proton hızlandırıcısını hem enerji hem de akımı arttırmak için geliştirme çalışmaları sürmektedir. En kısa sürede proton akımını 2 mA'e çıkarmayı planlamaktadırlar. Burada asıl amaç Hızlandırıcı Sürümlü Sistem (ADS) olarak da bilinen yeni nesil reaktör sistemine proton enjektörü olması planlanmaktadır. Bu sistem için alt limit olan 1 MW güçte çalışan bir proton hızlandırıcısı gerekmektedir.

Bu çalışmalar Avrupa'daki Hızlandırıcı Sürümlü Sistem (ADS) projesine katılan bütün ortaklar için azami öneme sahiptir. Hem yeni teknolojiler için veri oluşturmak hem de Avrupa'nın enerji problemini çözmeye yönelik kritik ve bir o kadar da önemli bir çalışmadır.



Resim 3.10. 590 MeV enerjili dairesel hızlandırıcı.



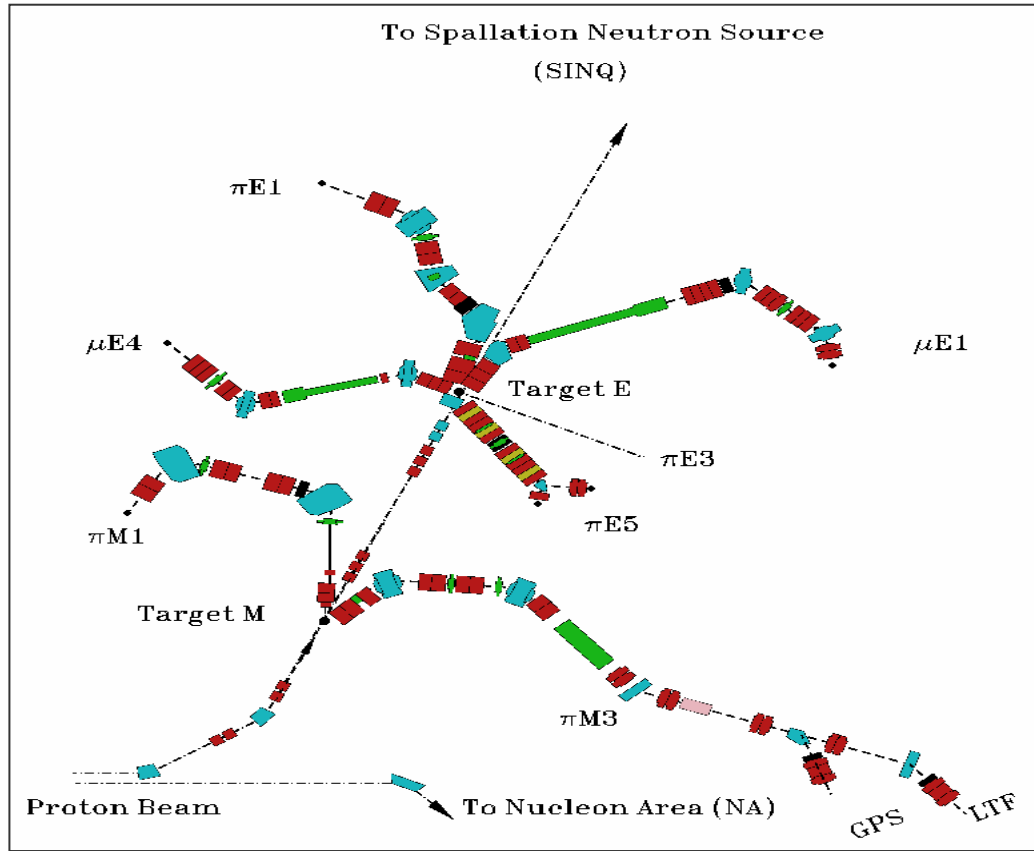
Şekil 3.2. PSI'daki deney istasyonları ve proton hızlandırıcıları.

3.4. PSI'daki İkincil Demetler

Demet hatları;

- π M1 demet hattı
- π M3 demet hattı
- π E1 demet hattı
- π E3 demet hattı
- π E5 demet hattı
- μ E1 demet hattı
- μ E4 demet hattı
- SinQ demet hattı

olmak üzere sekiz ikincil demet hattı vardır.



Şekil 3.3. PSI'daki ikincil demetler.

3.4.1. π M1 demet hattı

π M1 demet hattı 100 ile 500 MeV/c aralığında bir momentuma sahip yüksek kararlı pion demet hattıdır [5].

Hat hedef tekerleğin yönlendirmesinden 22 derecelik açıyla TM hedef istasyonunu bağlıdır. Çünkü bu, noktasal pionlar yatayda 2mm genişliğinde hedeften daha küçük üretilir. 7 cm / % yüksek dispersiyonla birlikte, demet hattının sonu ve üretim hedefinin ortasında IF orta seviyeli odaklama da 0,1% den daha iyi kararlı momentum kazanmaktadır [5].

Pion momentumu orta odaklamada yerleşen 64 sintillator stripte üretilen bir hodoscope da çarpışmalar kararlı olabilir [5].

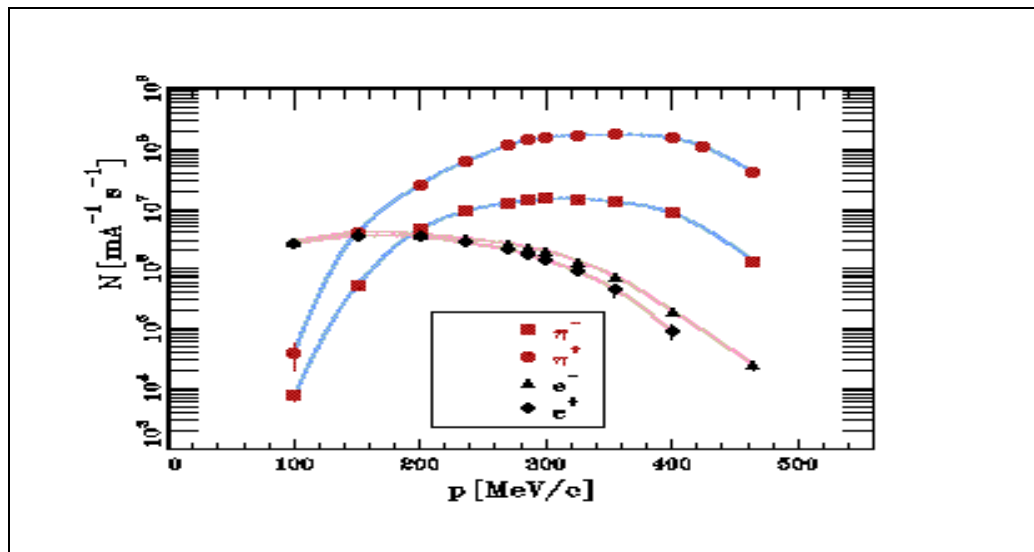
Çizelge 3.1. π M1 demet hattının özellikleri.

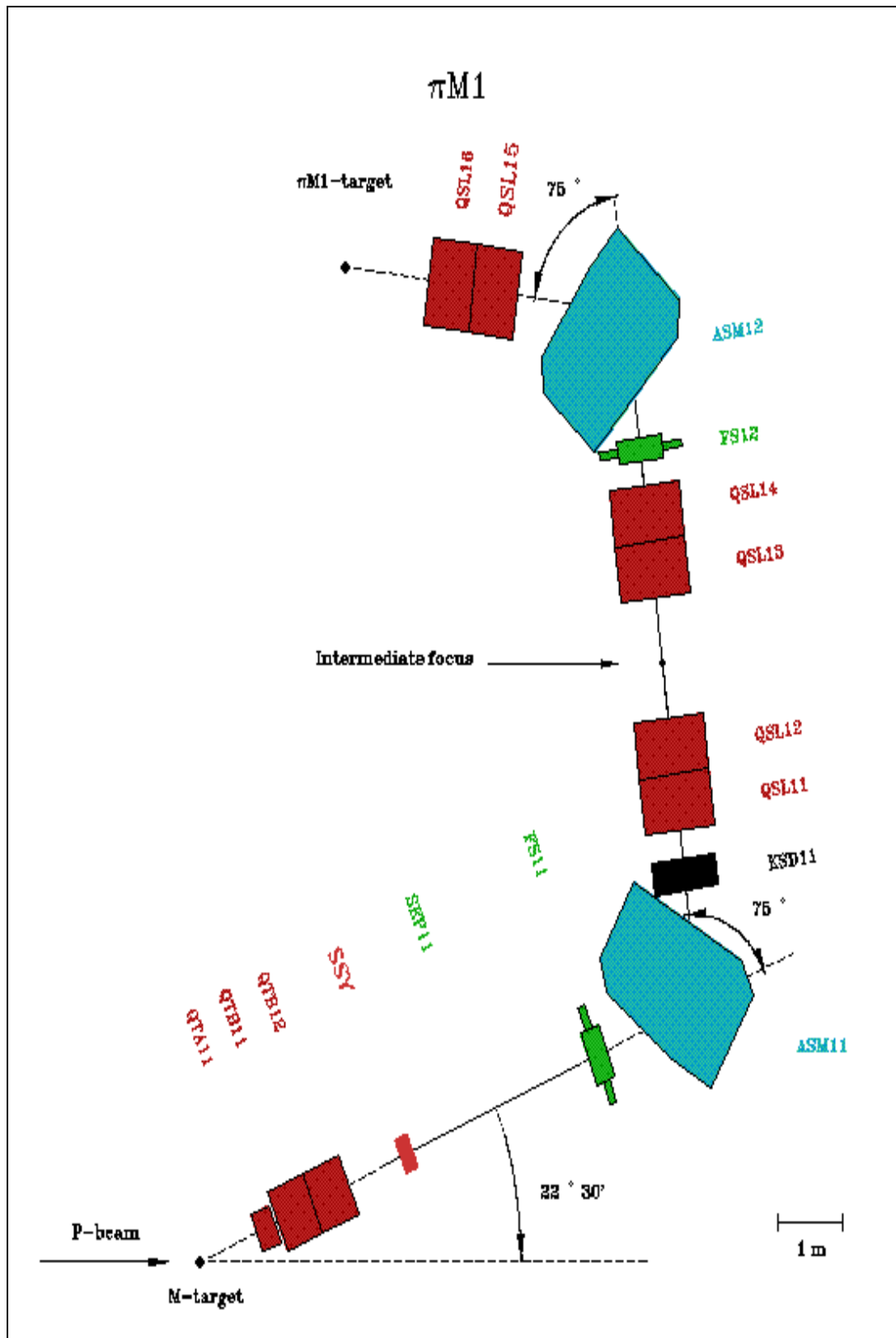
Toplam yol uzunluğu	21 m
Momentum aralığı	100-500 MeV/c
Katı açısı	6 msr
Momentum akseptansı (FWHM)	2.9 %
Momentum dağılımı	0.1 %
Odaksal düzlemde dispersiyon	7 cm/%

Çizelge 3.1. (Devam) π M1 demet hattının özellikleri.

Hedefte spot büyüklüğü (FWHM)	15 mm yatay
	10 mm düşey
Hedefte açısal diverjans (FWHM)	35 mrad yatay
	75 mrad düşey

Demet hattı CERN’de inşa edilen bir elektrostatik seperatöründe kapsamaktadır, bu seperatör π^+ demetindeki proton kirliliğini 300 MeV/c momentumunda 400% den yaklaşık 5 % kadar indirgemektedir. Şekil 3.5.’te standart demet hattındaki parçacık akısının momentum fonksiyonu eğme verimi pik 10%’luk belirsizlik vermektedir. Müon akısı 300 MeV/c momentumu aralığındaki pion flux ından 100 kere daha küçüktür ve düşük momentuma doğru pionlardan daha yavaş düşer. π M1 den önce sadece bir ince pencere yanında vakum proton kanalında vakum ayırıştırma sistemi vardır, dolayısıyla yüzey müonları elde edilemez [5].

Şekil 3.4. π M1’deki pion akısı.



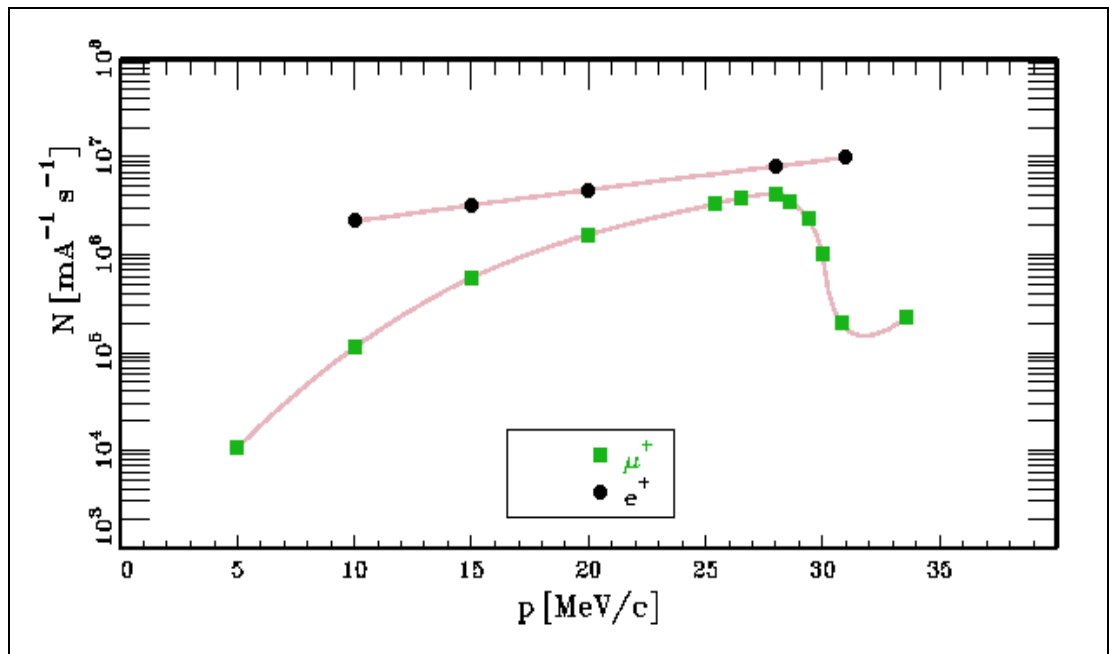
Şekil 3.5. $\pi M1$ demet hattının magnetleri.

3.4.2. π M3 demet hattı

π M3 demet hattı seçilmiş yüzey ve alt yüzeye kadar müonlar ile μ SR uygulamaları için kurulmuş tek hattır. Orijinal kanal 350 MeV/c'ye kadar pionlar için optimize edildi. Demet ileri yönde ince hedef TM'ye 22,5 derece açı ile eklenmiştir [6].

Demet hattı önünde bir üçlü yarım kuadropol 30msr'lik geniş katı açı akseptansına izin verir. Taşıma momentum bandı ara dağılım odağında yerleşen yarıklar kullanılarak 1% ile 3% arasında seçilebilir [6].

CERN'de inşa edilen 3 m uzunluğunda çapraz alanlı separatör, bir müon spin rotatörü yada bir elektron/müon separatörü yada her ikisi içinde kullanılabilir. Separatörlerden sonra demet, iki deney istasyonuna yöneltilir. Birincisi düşük sıcaklık uygulama bölgesi (LTF), ikincisi ise μ SR uygulamaları için kurulan genel amaçlı deney istasyonudur (GPS). 34 MeV'in üzerindeki pozitif müonlar ve pozitronların oranı ölçülmekte ve kullanılan separatörle pozitron kirliliği 1-2 % seviyesine kadar azaltılmaktadır [6].



Şekil 3.6. π M3'deki müon ve pozitron akısı.

3.4.3. $\pi E1$ demet hattı

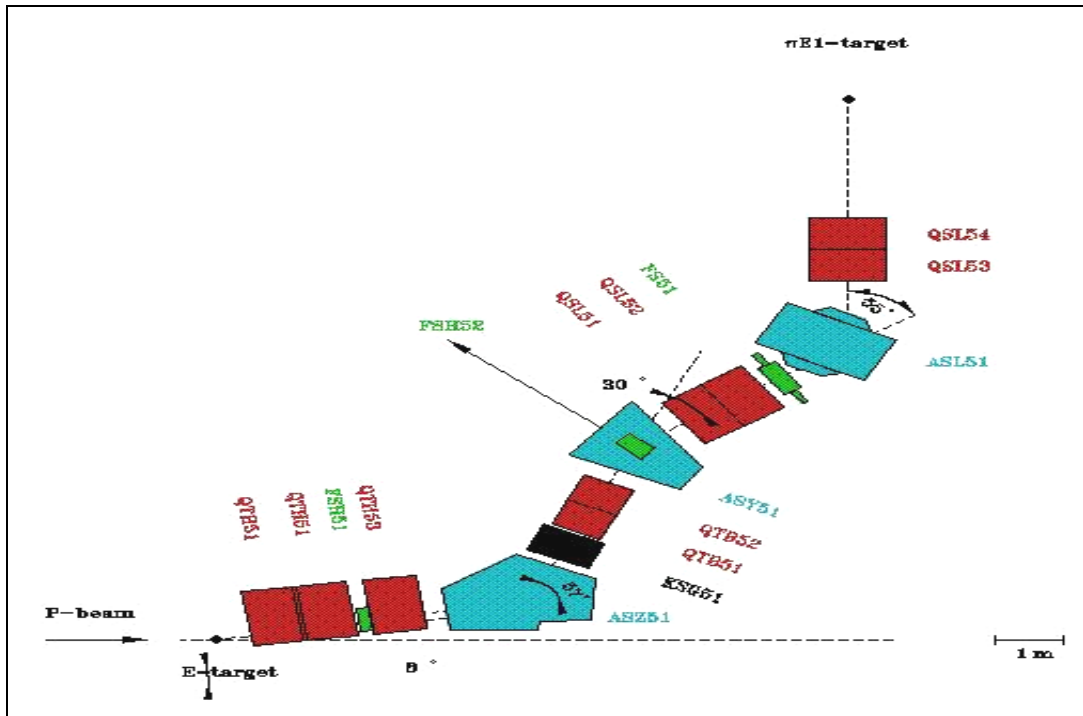
$\pi E1$ demet hattı momentumu 10 ile 500 MeV/c arasında değişken yüksek yoğunluklu müon demetlerini iletmektedir. Demet ileri yönde 10^0 'lik açıyla ince hedef TE'ye çıkarılmaktadır. Büyük açısal akseptans elde etmek için, demet hattında ilk odaklama elemanları olarak yarım kuadropol ile 20 cm çaplı uç kutuplu mağnet kullanılır. Sistemde vakum penceresi yoktur, yüzey ve alt yüzey müonlarının çıkışı mümkündür [7].

İki optik moda çalıştırılabilir.

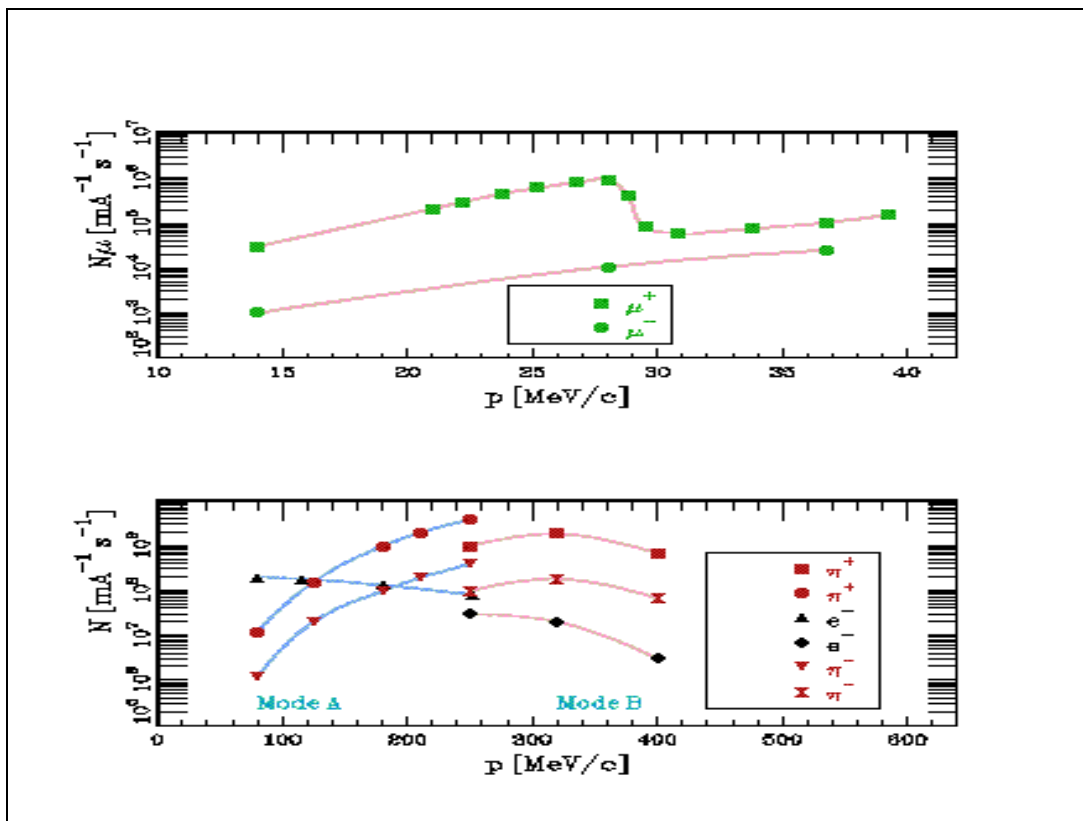
- Mod A düşük momentum kararlılığı ile yüksek flux sağlar, momentum ilk kuadropolde güçlü adaklamayla 280 MeV/c'e kadar azalır.
- Mod B, bir düşük akseptans, 500MeV/c momentumun üzerinde yüksek momentum kararlılığı modudur.

Çizelge 3.2. $\pi E1$ demet hattının özellikleri.

Mod	A	B
Uzunluk (m)	16	16
Max. Momentum (MeV/c)	280	500
Katı açı (msr)	32	13
Momentum akseptans (FWHM)	7.8 %	8.0 %
Momentum kararlılığı (FWHM)	0.8 %	0.26 %
Pi(+) Durma yoğunluğu($g^{-1}mA^{-1}s^{-1}$)	$2.5 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$



Şekil 3.7. $\pi E1$ demet hattının magnetleri.



Şekil 3.8. $\pi E1$ demet hattının A ve B modlarda oluşan pionların grafiği.

3.4.4. $\pi E3$ demet hattı

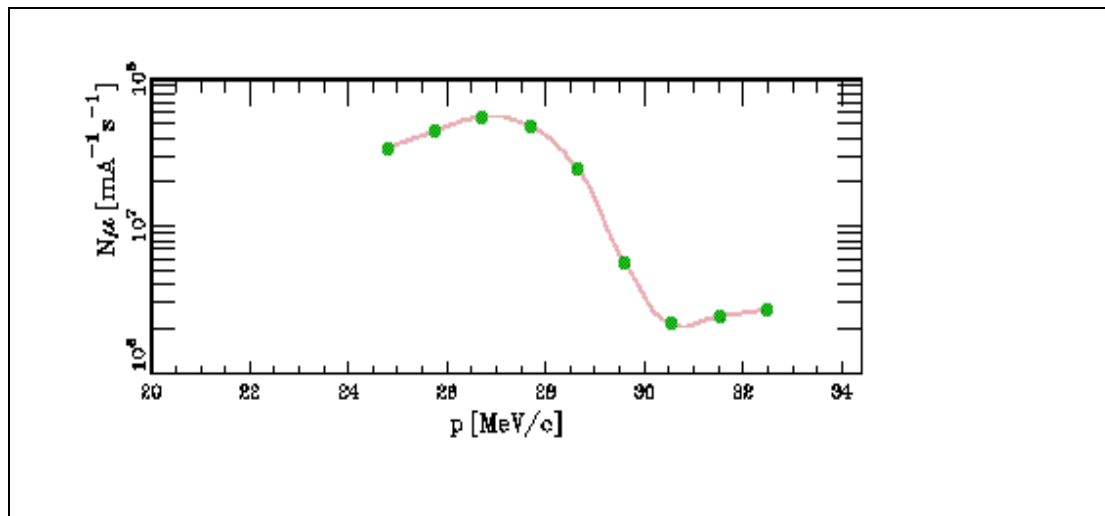
$\pi E3$ demet hattı 10 ile 250 MeV/c momentum aralığındaki pionları ve müonları iletir. Tasarımı düşük enerjili pion spektrometresi LEPS'nin optik özelliklerine benziyor ve demet hattı düşey düzlem eğimi ile hızlandırıcı katı seviyesinin 6 m yukarısındaki uygulama alanına gönderir [8].

Deney hattı iki moda çalıştırılabilir;

- Büyük akseptanslı akromatik mod
- Yüksek çözünürlüklü kromatik mod

Akım yoğunluğunu ve momentum akseptansının her ikisini de azaltmaya izin veren iki çift yarık vardır.

Akromatik mod: Bu mod durulmuş pionlar ve müonlar ile yüksek akı deneyleri için optimize edilmiştir. Genellikle bu mod müonlar ile yapılan deneylerde kullanılır. Odaklama noktasında 28 MeV/c momentumu civarında pozitif müonların yoğunluğunun ölçümü Şekil 3.9'da verilmiştir. Ayrıca çapraz alanlı kütle seperatörü ve bir ikili kuadropole yüksek pozitron kirliliği 10 ile 20 % seviyesine kadar azaltılabilir [8].



Şekil 3.9. $\pi E3$ akromatik modda pozitif müon akısı.

Çizelge 3.3. $\pi E3$ demet hattının akromatik modun özellikleri.

Uzunluk	13 m
Katı açısı	16 msr
Momentum akseptansı (FWHM)	8 %
Spot büyüklüğü (FWHM)	15 mm yatay
	30 mm düşey
Diverjans (FWHM)	80 mrad yatay
	20 mrad düşey
Yüzey müon polarizasyonu	95 %

Kromatik mod: Bu mod düşük enerjili pion spektrometresi LEPS ile birlikte özel olarak tasarlanmıştır. Momentum kararlılığı 3 %'dür.

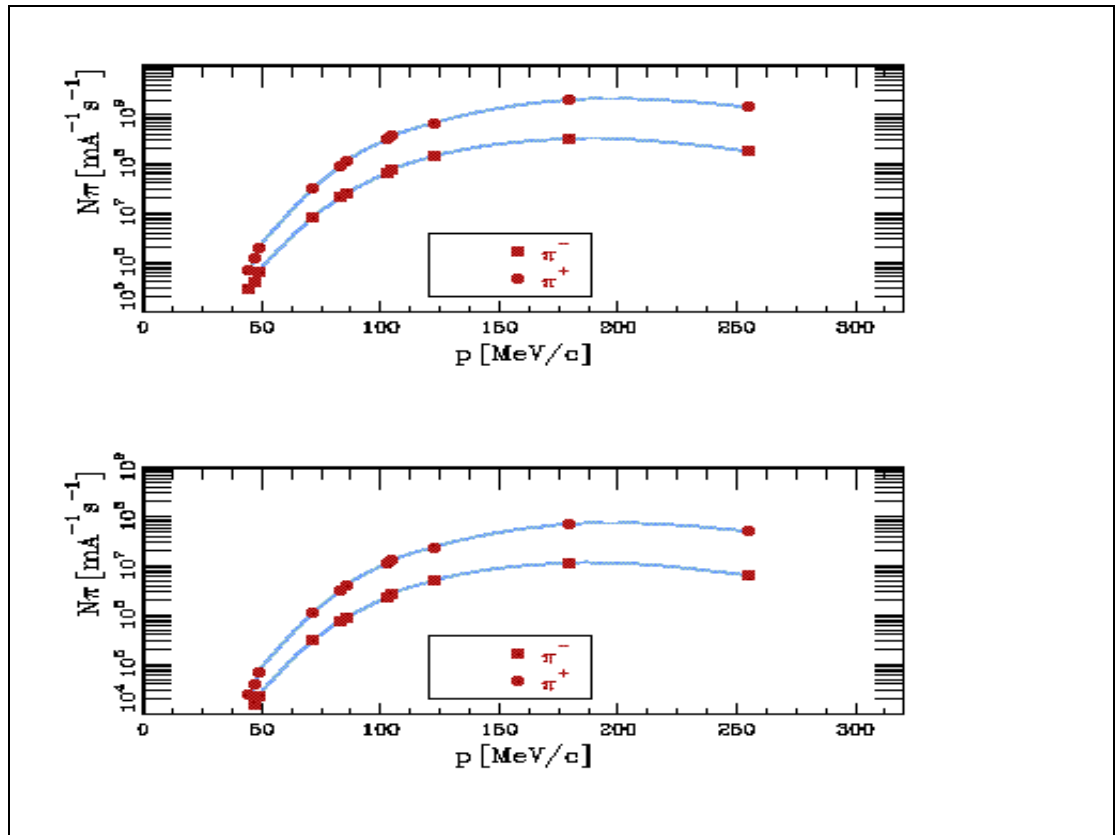
Kromatik modun özellikleri Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Bu modda ikinci yarı konumunda bulunan bir dispersif odak sayesinde elde edilen momentum bandı belirlenebilir [8]. Bu modlar da maksimum akım 200 MeV civarındadır.

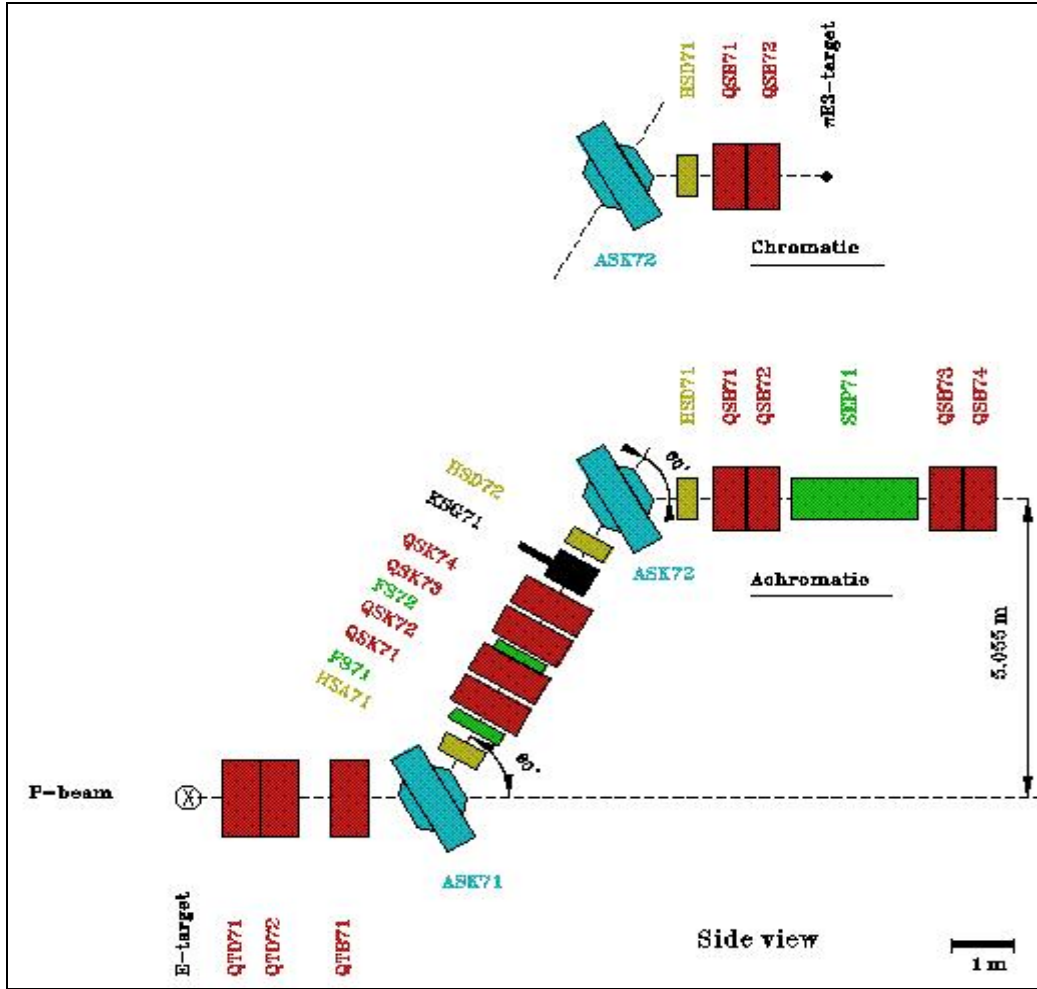
Pion oranı şekil 3.10.'de verilmiştir [8].

Çizelge 3.4. π E3 demet hattının kromatik moddaki özellikleri.

Uzunluk	13 m
Katı açısı	7 msr
Momentum akseptansı (FWHM)	3.4 %
Momentum kararlılığı (FWHM)	0.3 %
Dispersiyon	- 5cm / %



Şekil 3.10. Akromatik modda pozitif pion akısı (üstte), kromatik moda pion akısı (altta).



Şekil 3.11. $\pi E3$ demet hattının magnetleri.

3.4.5. $\pi E5$ deney hattı

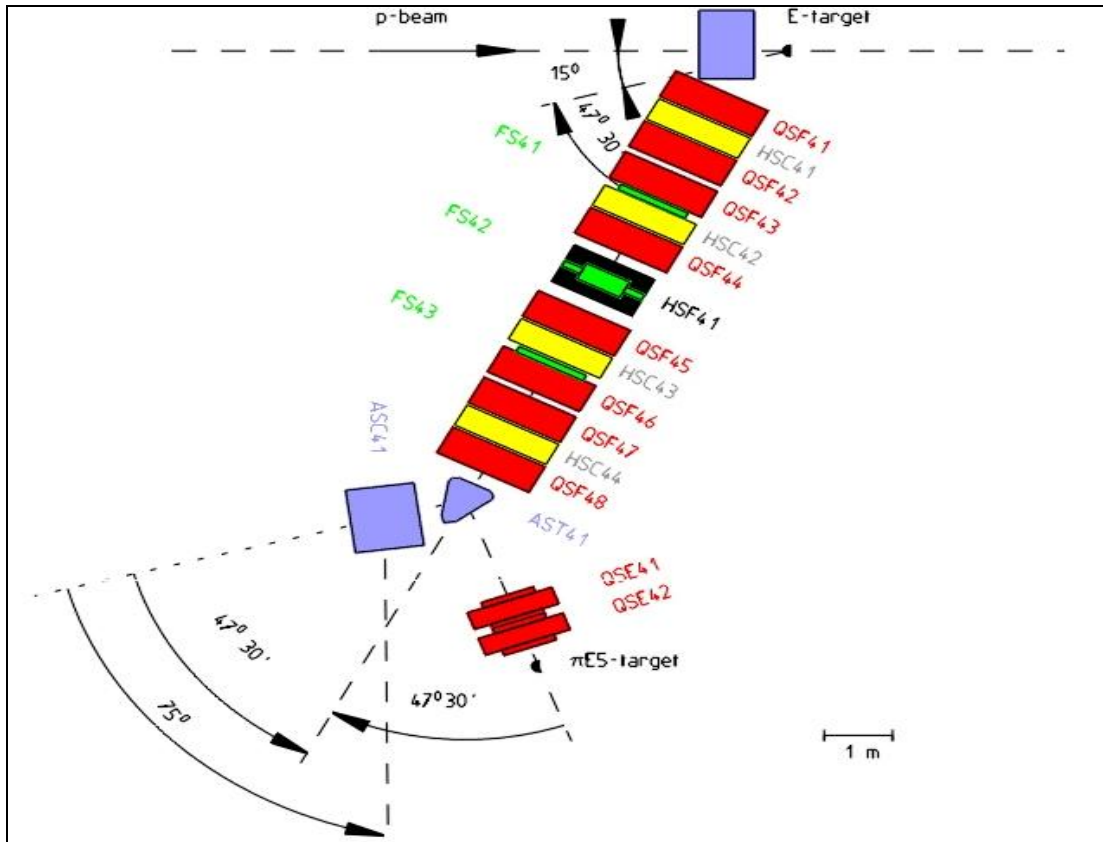
$\pi E5$ demet hattı, birincil proton demetine göre hedefi 175^0 ile gören düşük enerjili (10- 120 MeV/c) pion ve müonların iletildiği demet hattıdır. Demetin genel özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir [9].

Çizelge 3.5. $\pi E5$ demet hattının özellikleri.

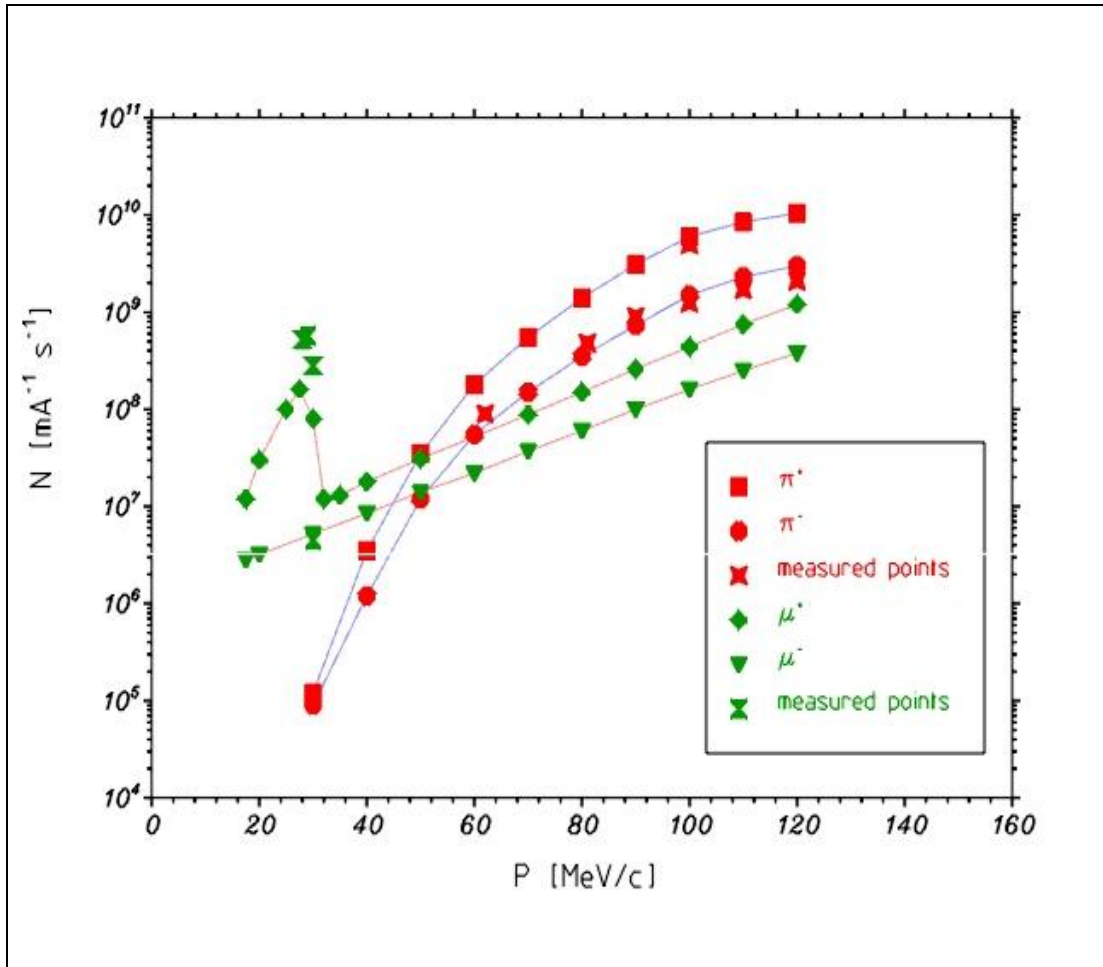
Uzunluk	10.4 m
Katı açısı (FWHM)	150 msr

Çizelge 3.5. (Devam) π E5 demet hattının özellikleri.

Momentum akseptansı (FWMH)	10 %
Momentum kararlılığı (FWMH)	2 %
Spot uzunluğu (FWMH)	15 mm yatay
	20 mm düşey
Açısal diverjans (FWMH)	450 mrad yatay
	120 mrad düşey

Şekil 3.12. π E5 demet hattının magnetleri.

İkinci mağnet AST, kısa zaman aralıklarında anahtarlamalarla iki alternarif olan U kısmından Z kısmına hizmet verebilmek için tasarlanmıştır. Demet hattının ortalarında momentum sınırlamalı yarık sistemi yerleştirilmiştir. Sapmaların büyümesinden dolayı momentum çözünürlüğü düşüktür (2 % FWHM). Final odakta durum daha iyidir. Demet hattının simetrik yapısı sebebiyle bazı sapmalar hat sonunda kaybolur[9].



şekil 3.13. $\pi E5$ 'deki pion ve müon akıları.

3.4.6. $\mu E1$ demet hattı

$\mu E1$ demet hattı, çok küçük pion ve elektron kirliliği ile orta enerji yoğunluktaki polarize müon demetini bir uygulama alanına iletir.

$\pi E1$ demeti ileri yönde ince hedef TE'ye gelen pionlar kullanılan üçlü yarım kuadropolden 10^0 'lık açıyla demet çıkışı alınır. Demet hattı üç bölümden oluşur [10].

- Bir pion toplama bölgesi
- Bir uzun süper iletken solenoid
- Bir müon çıkış bölgesi

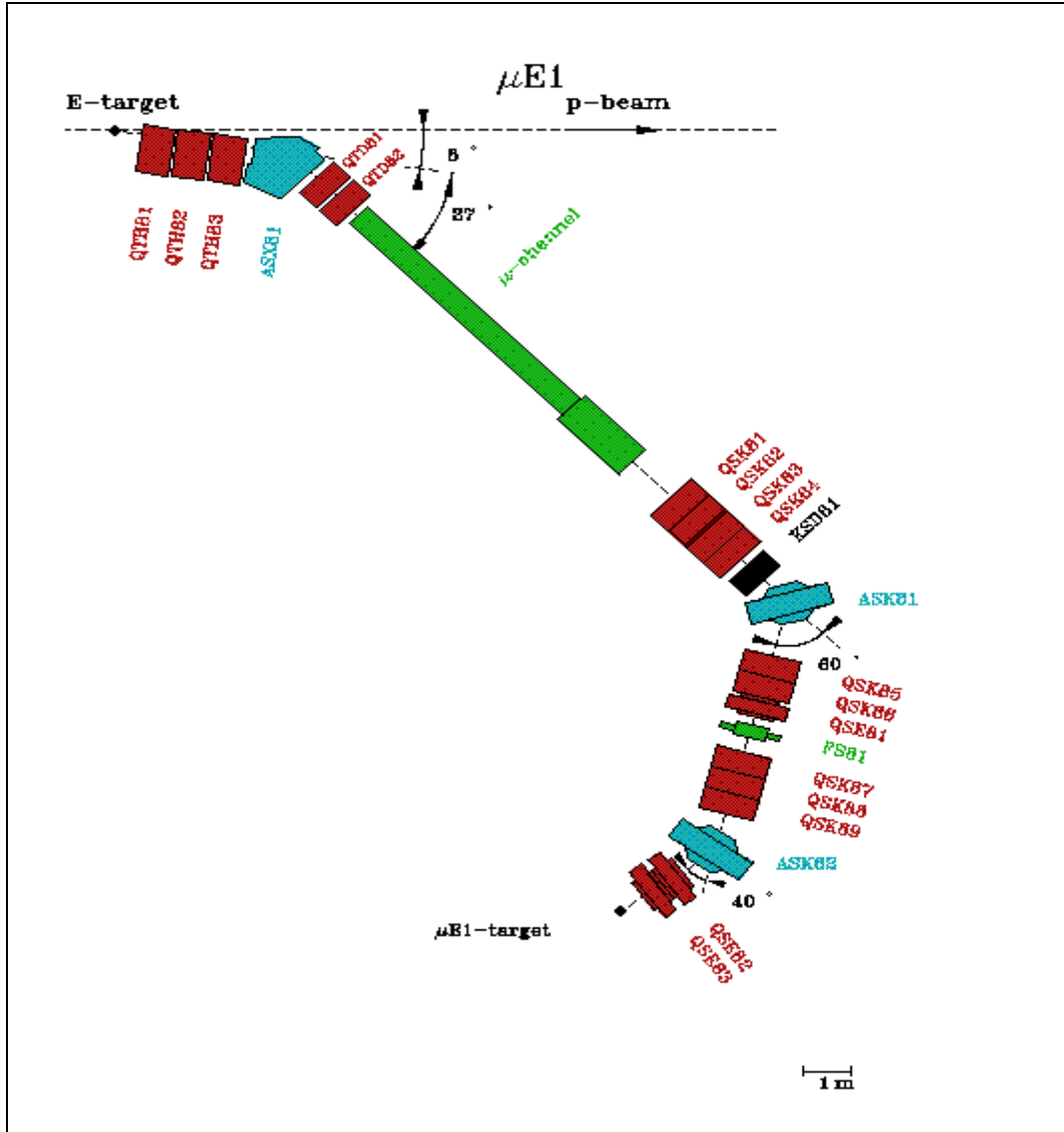
Demet hattının ana özellikleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 3.6. $\mu E1$ demet hattının özellikleri.

Mod	A	B
Momentum akseptans (FWHM)	3 %	1 %
Pion momentum aralığı (MeV/c)	200 125	220 125
Müon momentum aralığı (MeV/c)	125 85	125 85
Negatif müon oranı ($\text{mA}^{-1}\text{s}^{-1}$)	6e7 3e7	2e7 1e7
Spot uzunluğu (FWHM)	yatay	39 mm
	düşey	25 mm
		28 mm
		17 mm

Mod A , en yüksek olası akı'daki uygulamalar için düşük momentum kararlılığında çalışan akromatik moddur [10].

Mod B, ince hedef uygulamaları için iyi momentum kararlılığında çalışan kromatik moddur [10]. Momentum akseptansı (FWHM) 1 %'dir.



Şekil 3.14. $\mu E1$ demet hattının magnetleri

3.4.7. $\mu E4$ demet hattı

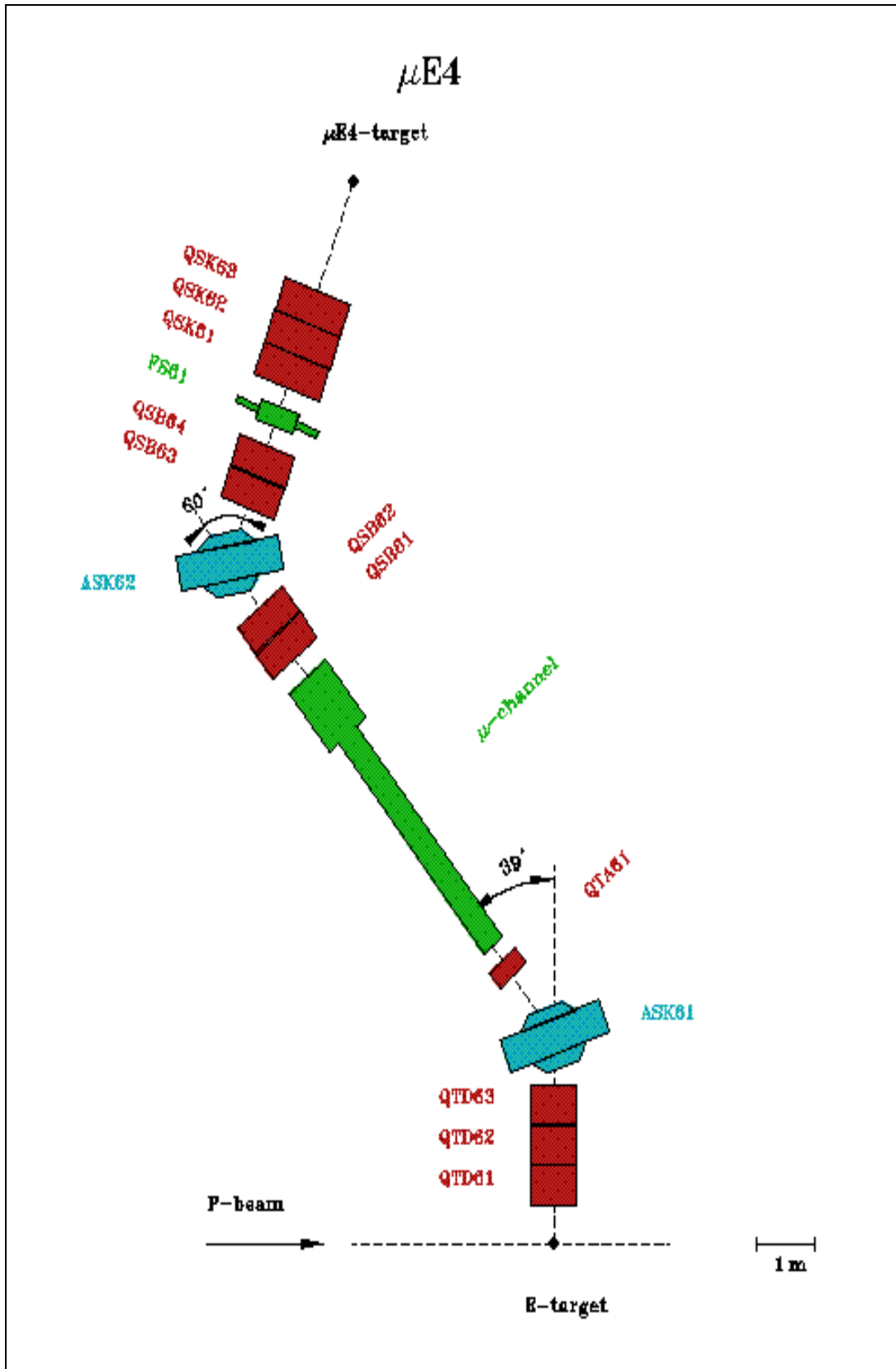
$\mu E4$ demet hattı, 30 ile 100 MeV/c momentum aralığında yoğun polarize bir müon demeti için optimize edilmiştir. Aslında bu hat $\mu E1$ hattının bir kopyasıdır [11]. Demet hattı üç bölümden oluşur;

- bir yüksek pion akseptans bölümü
- bir süper iletken solenoid bölümü
- bir çıkış bölümü

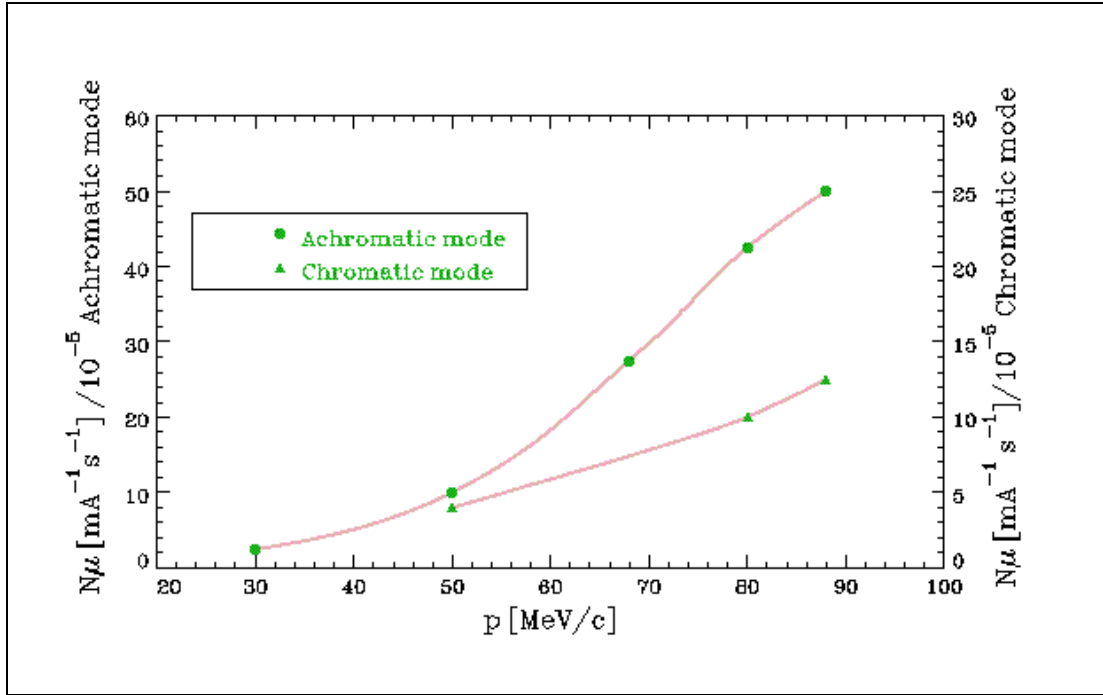
Demet hattı hedef istasyon TE'ye 90^0 'lik açıyla 6 cm uzunluğundaki karbon üretim hedefine eklenmiştir. Benzer düşük enerjili pionlar, 5 m uzunluktaki süper iletken solenoitten geçtikten sonra iki farklı moda çalışmak üzere sistemden çıkış alınır. $\mu E4$ demet hattının ana özellikleri aşağıda tabloda verilmiştir [11].

Çizelge 3.7. $\mu E4$ demet hattının özellikleri.

Mod	A	B
Momentum akseptansı (FWHM)	15 %	3 %
Solenoid sonunda demet spotu (mm FWHM)	50 yatay	
	35 düşey	
Solenoid sonunda demet diverjansı (mrad FWHM)	100 yatay	
	300 düşey	
88.5 MeV/c' de CH2 aralığı (g/cm ²)	2.0	0.5
50.0 MeV/c' de CH2 aralığı (g/cm ²)	0.3	0.10
Hedefte demet spot büyüklüğü (mm FWHM)	60 yatay	
	40 düşey	
Müon polarizasyonu (%)	75	



Şekil 3.15. $\mu E4$ demet hattının mağnetleri.



Şekil 3.16. μE4 'deki negatif müon akısı.

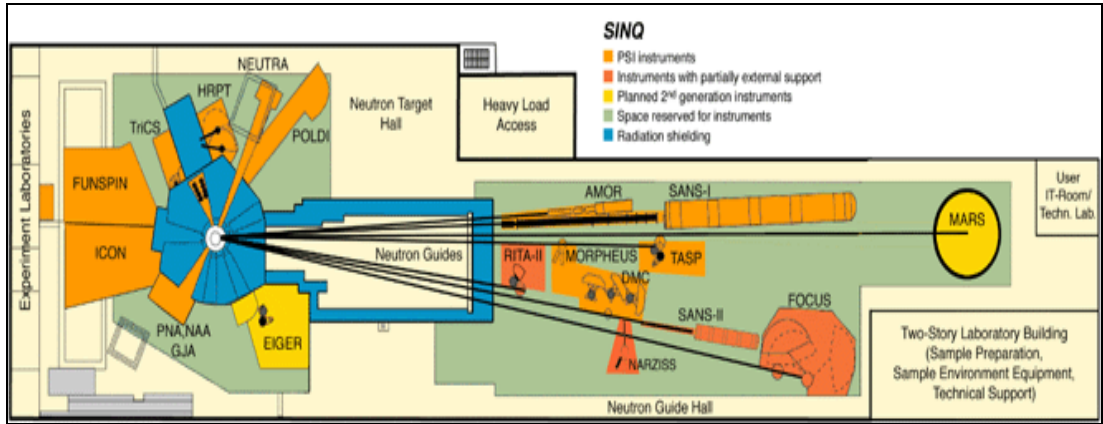
3.4.8. SİNQ hedef istasyonu

590 MeV proton demet hattı kanalının bu bölümü 55 m uzunluğunda ve ana bölümü 4 eğici manyet, 12 kuadropol lens 9 (yatay ve dikey) durum monitörü, 5 yatay yönlendirici manyet, 7 kollimatör ve 2 yarık çiftinden oluşur. Demet, E hedefinden (4 ve 6 cm) sonra yeniden biçimlendirilir. Proton demetini kollimatörle, yarıklar ve iletim düzenekleriyle protonun ikinci yarısında olan SinQ hedefine mümkün olan en az kayıpla iletmektedir [12].

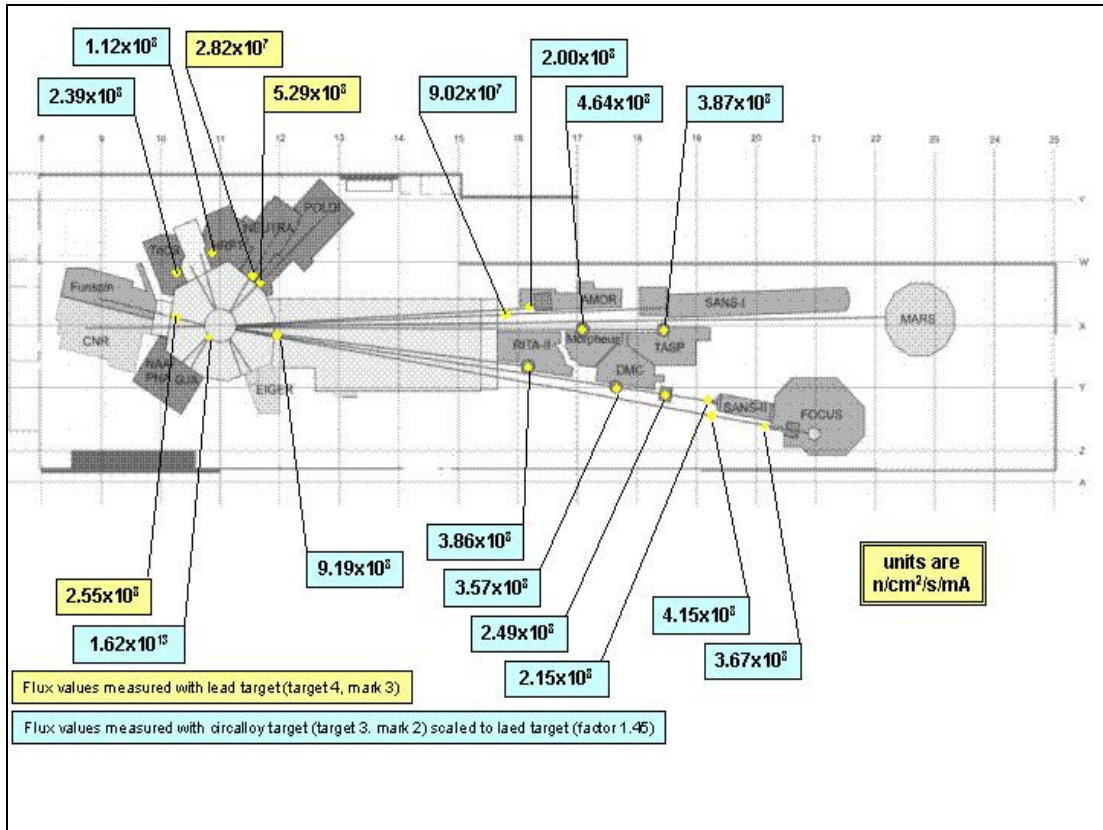
SinQ'da bulunan spallasyon hedef, sıralanmış kurşun çubuklar, pürüzsüz çelik tüpler ve ağır su soğutması akışı ile çalışan soğutma sistemi hedefi çevrelemiştir. Asıl amaç; yüksek nötron flux'ı elde etmek için soğutma/ moderatör bölgesinde nötron absorpsiyonunu azaltmaktır [12].

1mA'lık bir proton demetinde, moderatör sayesinde termal enerjili seviyeye indirilmiş saniyede yaklaşık $3-6 \cdot 10^{16}$ tane yüksek enerjili spallasyon nötron üretiliyor. Yaklaşık 2 m çapındaki silindirik moderatör tankı bir hafif su reflektörü ile çevrelenmiştir. Tank yerin kat seviyesinde demet tüpleri ve nötron yönlendiricileri

yoluyla termal ve soğuk nötronlar yatay çıkışlara iletilir. Termal nötronlar hedef bloğun 4 bölümünde uygulama alanlarına çıkarılırlar. Her bölüm iki demet tüpü ile farklı uygulamalarına giden termal nötronlar sahiptir [12].



Şekil 3.17. SinQ'nun deney istasyonları.



Şekil 3.18. SinQ deney hatlarındaki nötron akıları.

Toz Difraktometresi

HRPT (Yüksek kararlılıklı toz difraktometresi - Termal nötronlar)

DMC (Toz difraktometresi - termal nötronlar)

Tekli Kristal Difraktometresi

TriCS (4 dairesel difraktometre – Termal nötronlar)

Küçük Açılı Saçılma

SANS-1 (Küçük açılı nötron saçılma kamerası, 40 m – soğuk nötronlar)

SANS-2 (Küçük açılı nötron saçılma kamerası, 12 m – soğuk nötronlar)

Reflektometre

AMOR (Çok amaçlı reflektometre – soğuk nötronlar)

Uçuş Zamanı Spektrometresi (n-TOF)

FOCUS (Uçuş zamanı spektrometresi – soğuk nötronlar)

Üç-Boyutlu Spektrometre

Rita-2 (3-boyutlu spektrometre – soğuk nötronlar)

TASP (3-boyutlu spektrometre – polarizesoğuk nötronlar)

İki-Boyutlu Difraktometre

MORPHEUS (2 açılı ve optik difraktometre)

Strain Scanner

NEUTRA (nötron radyoğrafi uygulaması – termal nötronlar)

ICON (soğuk nötron radyoğrafisi)

PNA (izotop üretimi – termal)

NAA (nötron aktivasyon analizi - termal)

GJA (filyon sonucu gaz jet üretimi – termal)

FUNSPIN (polarize soğuk nötron uygulaması- parçacık fiziği)

Proje aşamasında olanlar

MARS (mikro analizli yüksek kararlılıklı tof geri saçılma spektrometresi)

EIGER (yoğunluğu arttırılmış ve en iyi enerji aralığında üç boyutlu nötron spektrometresi – soğuk nötronlar)

ECHO (ultra küçük açılı nötron saçılması)

PSTS (faz uzayı dönüşüm spektrometresi – ultra soğuk nötronlar)

4. HIZLANDIRICI SÜRÜMLÜ SİSTEMLER

Hızlandırıcı sürümlü sistem, hızlandırıcı kullanarak parçalanma yoluyla nötron üretimi temeline dayanmaktadır. Bu düşünce çok uzun bir süreden beri mevcuttur. İlk olarak 1950’de Berkeley’de Ernest Lawrence tarafından Uranyumdan Plütonyum üretme fikri ortaya atılmış fakat, (Materyal Test Hızlandırıcı Projesi’nden) 1954’de vazgeçilmiştir. 1952’de Kanada’da W. B. Lewis tarafından CANDU tipi reaktörler için hızlandırıcı kullanılarak Toryumdan Uranyum üretme fikri ortaya atılmıştır.

Hızlandırıcı GÜdümlü Sisteme özellikle Japonya’da ve Amerika’da 1980’lerde ve 90’ların başında yeniden ilgi duyulmaya başlandı. Buradaki amaç aktinitlerin dönüştürülmesi için hızlı nötron hibrid sisteminin kullanılması ve toryum döngüsüne bağlı termal bir nötron sistemi kurmaktır. Son olarak ta, Carlo Rubbia tarafından ortaya atılan fikirse; araştırma aşamasındaki enerji üretimini de içine alan Termal Nötron Enerji Yükseltici Projesiydi [13].

Hızlandırıcı Sürümlü Sistemin bir uygulaması olarak hızlandırıcı kullanılarak yapılan, atıkların dönüştürülmesi olayı, atıkların ortadan kaldırılmasına alternatif bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. 1990’ların başında Los Alamos Ulusal Laboratuvarı, hızlandırıcı kullanılarak atıkların dönüştürülmesi çalışmasının geliştirilmesine liderlik etmiştir.

Uzun ömürlü radyoaktif maddeler daha kısa ömürlü veya kararlı olanlara dönüştürülürler [13].

Hızlandırıcı Sürümlü Sistem olarak da bilinen Hibrid Sistem, kritik altı reaktörle yüksek enerji ve yüksek proton akımına sahip hızlandırıcıyı birleştirmektedir[14].

Hızlandırıcı Sürümlü Sistem çalışmaları farklı koşullarda daha önceden önerilmişti ancak, yüksek akım ve yüksek güçte hızlandırıcılara ihtiyaç duyduğundan dolayı teknik olarak bu çalışmaları yapmak ancak son yıllarda mümkün olabilmektedir. Şu anda dünyanın birçok ülkesi bu konudaki çalışmalara başlamıştır.

Ülkemizde Hızlandırıcı Sürümlü Sistem çalışmaları daha başlangıç seviyesindedir.

4.1. Hızlandırıcılar Nükleer Enerjiye Nasıl Yardım Edebilirler

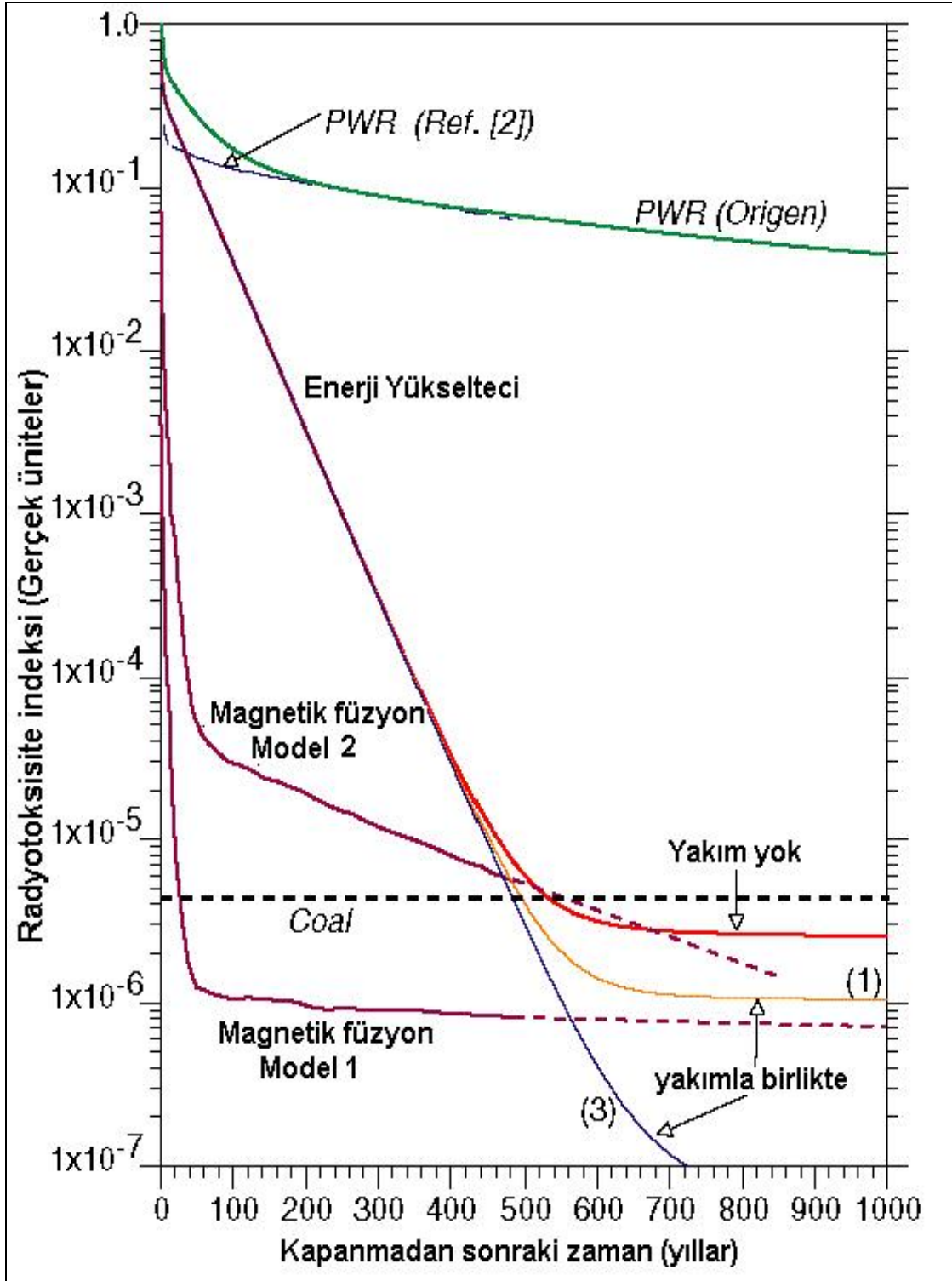
Nükleer reaktörlerin kullanılmaya başlanmasından bu yana iki büyük kaza meydana gelmiştir. Three Mile Island ve Çernobil. Her ikisi de kritik güç artışı sonucu meydana gelmiştir. Bu halk için ihmal edilmemesi gereken bir durumdur. Bir kazanın olma olasılığını 10^{-5} veya 10^{-6} seviyesine düşürmek mümkündür, fakat bu endişeleri azaltmayabilir. Büyük kazaların meydana gelemeyeceği, fiziksel kanunlar sayesinde olabilen gerçekten güvenli reaktörler ciddi olarak dikkate alınmalıdır. Diğer bir artış gösteren endişe de uzun ömürlü nükleer atıkların akıbetidir [15].

Bu geçmiş üzerine, Carlo Rubbia liderliğinde CERN'deki küçük bir grup, 1993'te nükleer enerji için hızlandırıcıların kullanımı ve gelişmiş Enerji Yükseltici projesi temeline dayalı yeni çözümler aramaya başladılar [13].

Nükleer reaktöre ek olarak bir parçacık hızlandırıcısının kullanılmasının önerilmesi nükleer enerjinin başlangıç zamanına dayanıyor. Fakat o zamanlar bu hiçte gerçekçi gözüküyordu. Hızlandırıcı ve bilgisayar gibi anahtar teknolojilerdeki gelişmeyle durum büyük oranda değişti [16].

Son 30 yılda hızlandırıcıların enerji verimliliği % 0,1'den % 50'lere kadar yükseldi ve hızlandırıcıların güvenliği de şu anda endüstriyel seviyede bulunuyor.

Hesaplama gücündeki ilerleme, araç ve işlemlerin daha önce hiç araştırılmamış, her seviyedeki detayların simülasyonla incelenmesine imkan sağlamaktadır. Bu detaylı tasarım çalışmaları, bazı planların öne sürülmesi ve yeni fikirlerin ortaya çıkarılmasına zemin hazırlamıştır[16].



Şekil 4.1. Gerçek üniteler için Radyotoksosite indeksi a) Sıradan Basınçlı Su Reaktörü (BSR) b) Magnetik Füzyon için model 1 ve 2 c) Yakım olmadan Enerji Yükseltici tahminleri d) Kömür yakılan reaktörlerde üretilen radyotoksosite.

4.2. Nasıl Bir Hızlandırıcı Olmalı

Enerji Yükselteci için proton hızlandırıcılarının asgari parametreleri: 10 mA akım, 1 GeV enerji, %50 hızlandırma verimidir. Mümkün olan iki çözüm vardır : siklotron veya bir lineer hızlandırıcı (Linac). Her ikisi de çalışmalar yapılmış ve % 50 verim elde edilebilmiştir. Siklotron (Zürich yakınlarındaki Paul Scherrer Enstitüsünde çalışan makinenin ekstrapolasyonu), daha basit bir teknoloji ile yapılabilmesi ve daha az yer kaplaması avantajına sahiptir [13].

Linak çözümü, Los Alamos LAMPF'dekinden daha çok LEP tipi süper iletken temeline dayalı olacaktır. Bunun yanında Linak, 400 MeV'de çalışan bir enjektöre ihtiyaç duymaktadır. Linak'ın asıl avantajı, ihtiyaç duyulduğunda daha yüksek akımda (30-50 mA) çalışabilmesidir [13].

Siklotron, süper iletken teknolojisini kapsamamaktadır. Ve böylece endüstri tipi uygulamalara daha fazla adapte olabilir [13]. Ancak teknolojik olarak 1 GeV siklotronlar için üst sınırdır.

Siklotronlar, Linak'lardan daha güvenlidir. Bu, Linak'ların Siklotronlardan daha fazla sayıda kontrol bileşeni içermesinden kaynaklanmaktadır [20]. Linak'ın asıl avantajı, ihtiyaç duyulduğunda daha yüksek akımda (30-50 mA) ve enerjide (> 1 GeV) çalışabilmesidir.

Eğer amaç atıkları nükleer reaktör yakınında yok etmek ise, hızlandırıcının daha küçük boyuta sahip olması avantajdır. Küçük boyut ticari olarak da avantajlı olabilir ve nükleer reaktörlerin yanına kurulabilir [13].

Hızlandırıcının tipinin seçilme aşaması hala belirsizliğini koruyor. Bir Siklotron veya bir Linak veya ikisinin bir kombinasyonu, her ikisinin de avantaj ve dezavantajları bulunuyor [15].

Şu anda kullanılan güçlerin artırımıyla, gerekli olan hizmetlerin karşılanabileceğine olan güveni desteklemek amacıyla yapılan araştırmaların sonuçları çok uzun süreden beri uygulanıyor. Örnek olarak çok büyük bir değişiklik yapılmadan inşa edilen

PSI'daki Siklotron ve Los Alamos'taki Linak verilebilir. Özellikle, Siklotron temelli çalışma, analiz edilmiş ve düzenlemeler saptanmıştır [15].

Hızlandırıcı, orta enerjiden yüksek enerjiye kadar (600 MeV'deki bir hedef) protonları hızlandırabilme kapasitesindedir. Siklotron temelli bir hızlandırıcı, yeterli dönme verimliliğinde çalışabilecek ve reaktörde baştan başa bir değişiklik gerektirmeyecektir [13].

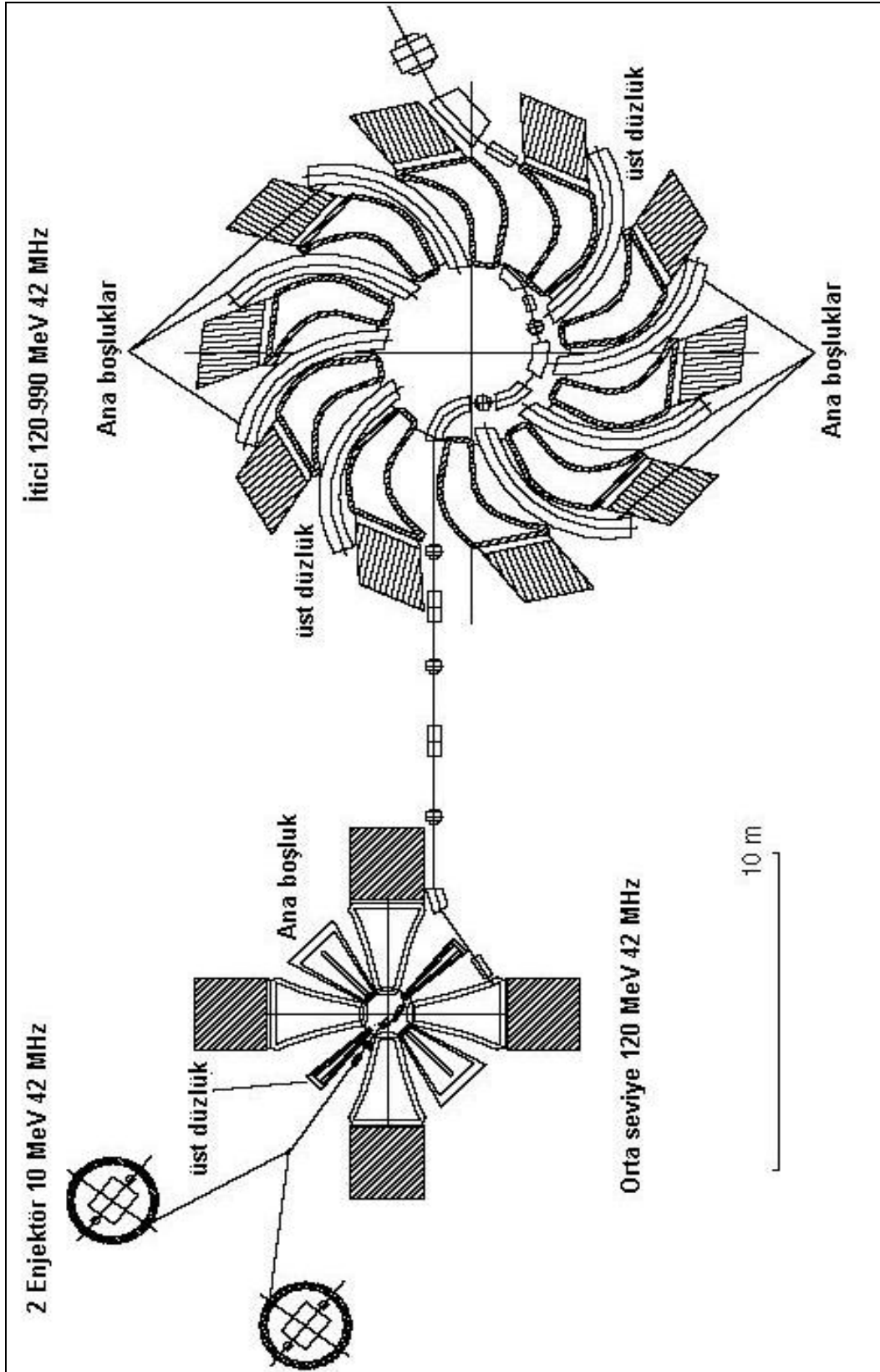
Catania Laboratuvarı , şu anda çalışan sistemlerin düzenlenmesi temeline dayanarak çalışan hızlandırıcı sistemlerin tasarımının anlaşılmasını amaçlayan bir çalışma yürütmekte. Bu çalışma proton demetinin gücü 3 MW'tan fazla kaynak kapasitesine sahip ve seri düzenlenmiş iki siklotron temelli bir çözümü göstermektedir. Bu sistem PSI proton hızlandırıcı sisteminin günümüz üst sınıf projesinin elektropolasyonuna odaklanmıştır [13].

Temeli üç safha olan sistem (ön enerji, enjeksiyon siklotron ve ek siklotron), max enerji çıkışı yaklaşık 600 MeV civarında ve max nominal akımı 5-6 mA'e kadar olabilecek proton demeti sağlayabilecek kapasitededir [13].

Ayrıca gerekli akımı sağlamak için birbirine seri bağlı siklotron fikri üzerinde de çalışmalar devam etmektedir.

Hızlandırıcı teknolojisinde süper iletkenlerin kullanılması son dönemde CERN'de yapılması planlanan Süper Proton Linak (SPL) üzerine ilgiyi arttırmıştır. Avrupa'da yapılan Hızlandırıcı Sürümlü Sistem projeleri için bu çalışmadaki veriler büyük öneme sahiptir. Hem hızlandırıcı uygulaması açısından hem de yapılacak olan nötron deneyleri (n-tof) açısından bu çalışmalar dikkatle izlenmektedir [4].

Dünya'da hızlandırıcılara yönelik süper iletken teknoloji kullanımına artan ilgisi göz önünde bulundurularak ülkemizde yaptığımız TAC projesinde bu konuda çalışmalara başlanmış ve halen çalışmalar sürmektedir [4].

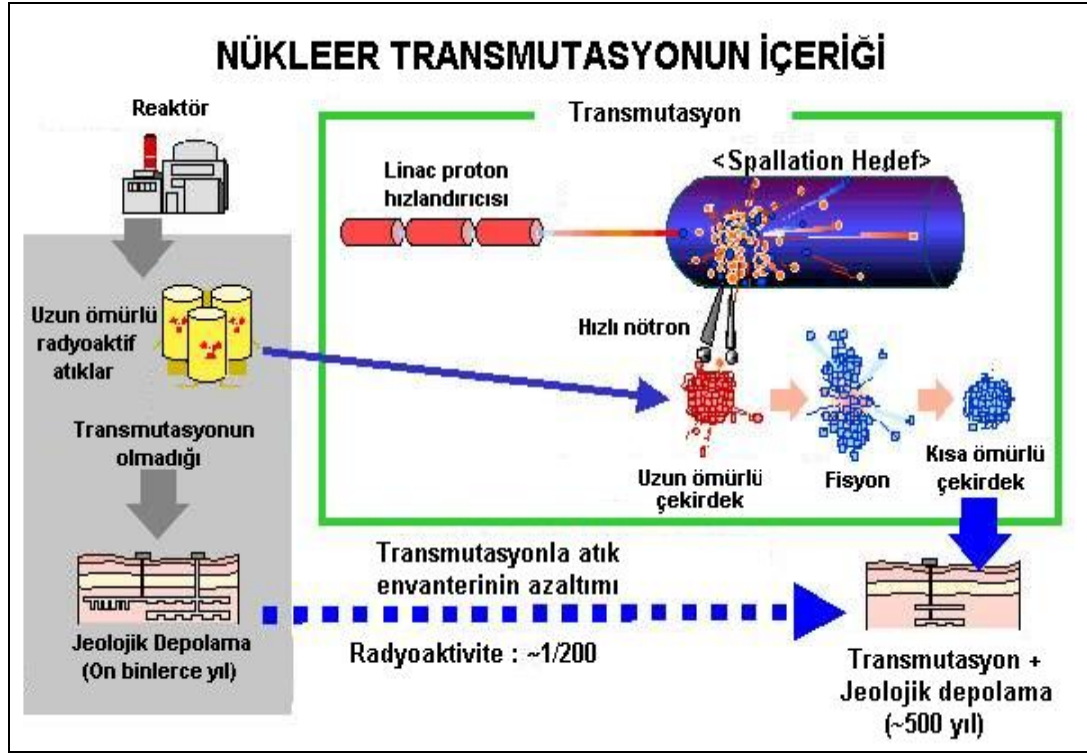


Şekil 4.2. Tasarlanan proton hızlandırıcısı.

4.3. Enerji Yükselteci : Temel Kavram

Hızlandırıcıdan gelen proton demetini kurşun hedefle etkileşime geçtiğinde parçalanma sonucu nötronlar oluşur. Nötronlar enerjilerini kaybederler ve kritik altı bölünebilir çekirdekle etkileşime girmek üzere yayılırlar. Fisyon yoluyla üretilen ısı, sıvı kurşun içerisinde doğal konveksiyon yoluyla çekirdekten ikincil kısma ısı dönüştürücüleri boyunca taşınır. Kurşunun varlığı, alışılmış sodyum soğutmalı hızlı reaktörlerden daha yoğun bir nötron spektrumu oluşturur. Bu, aracın hemen hemen tüm aktinitleri uygun bir olabilirlikte fisyon yapabilme yeteneğine sahip olmasına yol açar [13].

Isı taşıyıcı olarak kurşun kullanılması, güvenlik bakımından önemli bir katkı sağlar. Hızlı kritik reaktörlerde kapsamlı olarak kullanılan Sodyumla karşılaştırıldığında Kurşun, kimyasal olarak daha yavaştır ve yüksek sıcaklıkta bile düşük buhar basıncına sahiptir. Kurşunun yüksek yoğunluğu, soğutmanın pompalar kullanılmasına gerek olmadan doğal konveksiyon yoluyla yapılmasına imkan sağlamaktadır. Bu bir güvenlik özelliğidir; pompa yoksa hata da yoktur. Bununla birlikte nükleer özellikleri de dikkate değerdir. Kurşun, nötronları çok yavaş absorbe eden nükleer olarak soygazlara karşılık gelen iki kat çekirdek kabuğuyla kapatılmıştır. Büyük kütlesiyle de nötronları yavaşlatabilmektedir. Çok konuşulan Enerji Yükselteci'ne has bir güvenlik problemi, demeti hedeften ayıran perdedir. Bu, CERN'de ve diğer laboratuvarlarda 1 mm çapında ve ortalama 1 mA şiddetinde proton demetleriyle her yönden denenmektedir. Enerji Yükselteci 10.000 kat daha yüksek şiddeti kapsamakla birlikte, ışın yaklaşık 10 cm çapında olacak bu sebeple de akım aslında küçülecektir. Bunların hepsi açık olarak detaylı simülasyonun içinde yer almaktadır ve bir sonraki plan daha düşük proton enerjisinde testler yapmaktır. Perde kavramının sağlam olduğuna dair bir güven vardır ve reaktör çekirdeğini dış dünyadan ayıran bariyer de perdenin zayıf bir nokta olduğunu kimse söyleyemez. Aslında, perde kırıldığında, anında sıvı kurşun tarafından değiştirilir ve ışın tüpünü takip eden ışının hedefe ulaşmasını önleyerek çekirdekte fisyon olayının durmasını sağlar [16].



Şekil 4.3. Nükleer Transmutasyonun içeriği.

Kritik-altı Sistemin Hızlandırıcı Sistemle birleştirilmesi için, hedef ünite oluşturulurken 4 ana aşamanın yapılması gerekir:

- Proton demeti vakum içerisinde hareket etmeli.
- Proton demetini çekirdeğin merkezinde veya yanında olan ağır metal hedefe çarpmalı.
- Reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan enerjinin (yaklaşık 1kW/cc) reaksiyon bölgesinden taşınması gerekir.
- Reaksiyonlar sonucu oluşan radyoaktif elementlerin hapsedilmesi gerekir.

Enerji Yükseltici Deneysel Gösterimi için seçilen tasarımda reaksiyon ürünleri üretildikleri yerde hapsedilmektedir. Kurşun-bizmut hedef aşağıda belirtilen her iki çözümde de birincil soğutucudan ayrı olarak tutulmakta ve hedef yapıyla birlikte saklanmaktadır [13].

Hedef sistem yapısı kritik-altı çekirdeğin çevresel merkezinde olmalı. Buna karşılık gelen çap 620 mm. Reaktör kabının tam üstünden delip geçen bir demet borusu bulunmaktadır. Çekirdeğin üzerindeki hedef bölge, yakıt tutucu makine işlemlerine uygun max. çapa sahiptir. Demet borusunun çapı, demetin doğru şekilde odaklanabilmesini ve hedef sistem materyallerinde yüksek güç yoğunluğunun oluşmasını önleyebilmektedir.

Çözülmesi gereken en büyük konulardan biri hedef perdesinin yapılmasıdır. Bu, hızlandırılmış protonları taşıyan vakum borusuyla hedef arasındaki içyüzdür. İki hedef ünitenin özellikleri kavranmış ve Deneysel Gösterim için basit olarak yapılmıştır. Prensipinde bu iki ünite, proton demetinin vakum borusuyla hedefin nasıl ayrıldığı konusunda farklılık gösterirler.

Her iki çalışma prensibinde, perde veya kurşun-bizmut alaşım hedefin serbest seviyesi çekirdeğin merkezinde yer alacak şekilde tasarlanmıştır.

Perde, ince metalik levha özelliğinde, hedef ve vakum borusu arasında bariyer olarak görev yapar. Proton-nötron ışımasında (mümkün olan en geniş mesafeye kadar) saydamdır ve tipik hedef operasyonu gibi ciddi görev döngüsüne dayanabilecek şekilde yapılmıştır. Şiddetli proton/nötron ışımasıyla kurşun-bizmut alaşım ile aşınma sonucu oluşan termal ve basınç yüküne karşı koyabilmektedir. Reaksiyonlar sonucu oluşan ısı, hedefin ısı kaynağından daha yüksekte bulunan ısı dönüştürücüsüne akması sonucu oluşan doğal sirkülasyonla taşınabilmektedir [13].

Proton demeti, perdenin yapı ve geometrisine bağlı olduğu kadar demetin enerji ve boyutuna bağlı olarak enerjisinin %3'ü kadarının metal perdede bırakabilmektedir. Perdenin materyalinin seçimi çok ince bir husustur. Fiziksel ve yapısal özellikler, çalışma ısı, kurşun-bizmut yapısıyla uygunluğu gibi birçok faktöre bağlıdır. Çoğu zaman bu faktörlerin karşılıklı ilişkileri vardır. Perde materyalinin şu karakteristik yapıları yansıtması gerekir: aşılabilecek max. mesafe için; düşük yoğunluk, yüksek ısı nakli, düşük termal yayılma katsayısı, düşük Young modülü, küçük Poisson açısı, yüksek gerginlik gücü, radyasyon etkisi altında düşük kolay kırılabilir geçiş ısı

(DBTT). Sıvı metal etkisi için yüksek ışıma rezistansı, proton temelli radyasyon etkisi için yüksek rezistans [17].

Bununla ilgili diğer kaygılar; Hidrojen ve Helyum şişkinliği, sıvı metal kırılabilirliği, ışıma kuvvetlenmesi ve demet perde materyallerinin yabancı elementlere dönüşümü ile ilgili [17].

“Perdesiz” hedef konfigürasyonu kurşun bizmut hedefin serbest yüzeyi gibi davranır, bu sebeple de hızlandırıcıdan gelen proton demeti direkt olarak hedefe çarpar. Bu durumda, soğutma devresindeki doğal sirkülasyon modeli artık çalışmayacaktır. Çünkü, serbest seviye aynı zamanda ısı kaynağıdır. Serbest seviye, proton demet borusunda gerekli olan vakum tarafından daha yüksek seviyede tutulmaktadır. Sonuçta, hedef gaz kaldırma sistemiyle daha alçak yerde olan ısı dönüştürücüsüne yönlendirilmelidir [14].

Perdesiz hedef konfigürasyonunda, yapısal materyaller direkt olarak proton ışımasına tabi tutulmazlar, çünkü demet parçalanmış hedefin serbest yüzeyine çarpmaktadır. Bu konfigürasyon, materyallerin yapısal rezistans problemleriyle alakalı olmadığından daha kullanışlı görünüyor. Fakat, bu konfigürasyon sıvı metalin serbest yüzeyinin daha hassas kontrolünü gerektiriyor [14].

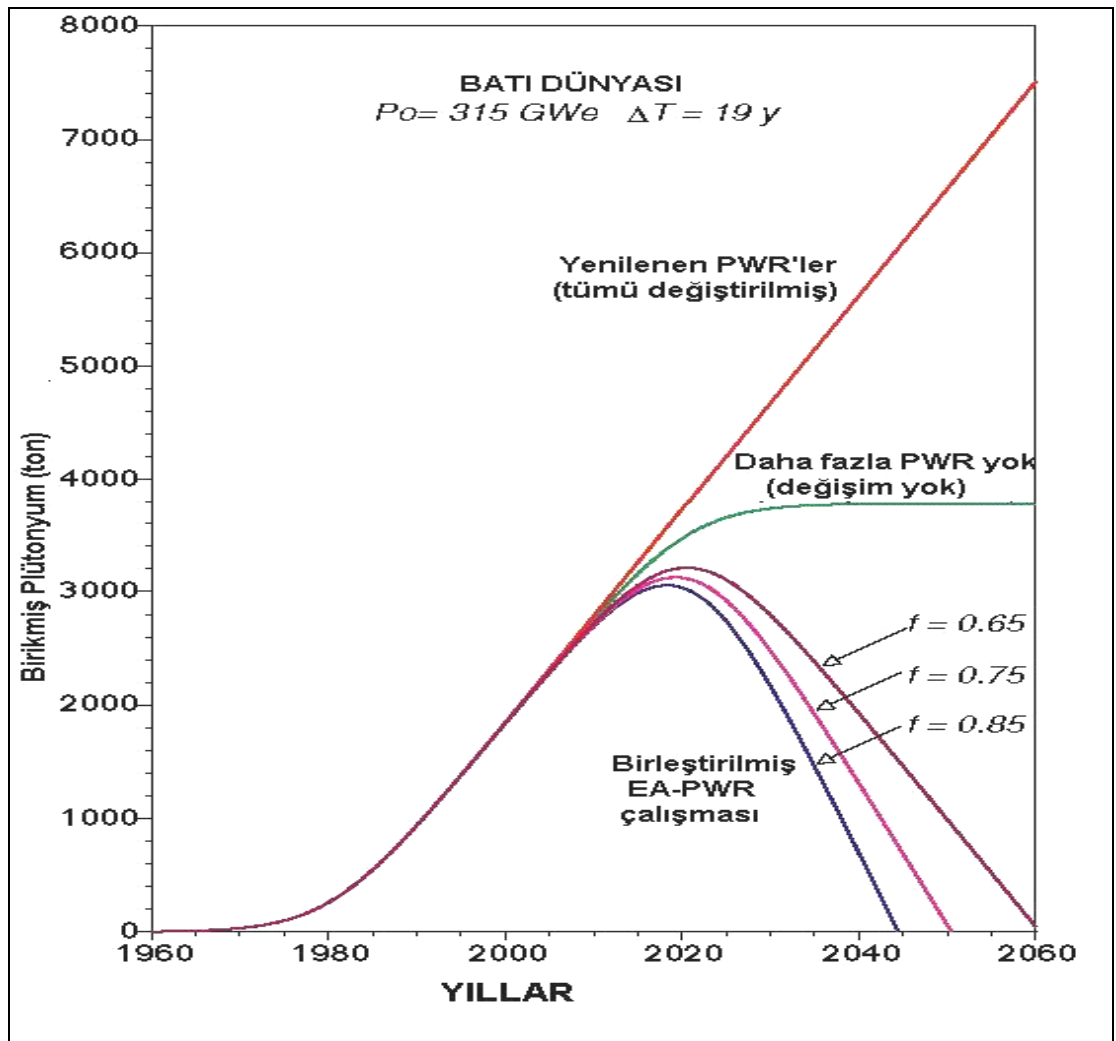
Hedef soğutma devresi, spallation tarafından üretilen yaklaşık 3,0 MW değerindeki ıyıyı kaldırmaktadır. Hedefin sistemin soğutulmasını sağlamak için iki seçenek mümkündür.

Hedefte üretilen ısı birincil soğutuculara doğru dağıtılır. Bu durumda, tüm Hedef Sistemi, reaktör çekirdeğinde özel bir yakıt elementine daldırılmış gibi davranır. Birincil soğutucuda Hedef ısı dönüştürücüleri boyunca giriş/çıkış sıcaklıkları, Reaktör soğutucu sistemin ısı döngüsü (300 °C, 400 °C) için aynıdır [13].

Hedef ile üretilen ısı, diyatermik sıvı soğutucularla beslenen bağımsız bir soğutma döngüsü ile taşınır. Soğutucunun Hedef Sisteme reaktör kabının dışından taşınması gerektiği için bu seçenek fazla tasarım karmaşası içermektedir. Avantajı, hedef ısı döngüsünün seçiminde esnekliğin fazla olmasıdır [25].

Belçika'da bulunan SCK-CEN'de MYRRHA projesi kapsamında da ADS konusunda çalışmalar yapılmakta olup 5 mA akımda 350 MeV enerjili protonlar kullanılarak reaktörün çekirdeğinde spallasyon saçılma deneyleri yapılmaktadır[19].

Rusya'da ise Phasotron adı verilen 660 MeV enerjili proton hızlandırıcısı kullanılarak kritik altı çalışan ADS temeline dayalı Plütonyumdan yararlanma araştırmaları yapılmaktadır [20].



Şekil 4.5. Batı Dünyasında (Amerika ve Avrupa) biriktirilmiş kirli plütonyum miktarının zamana bağlı olarak 3 farklı senaryosu 1) Günümüz toplam güç seviyesine uyacak şekilde tüm reaktörlerin yeniden yapılması 2) Daha fazla reaktörün yapılmadığı, nükleer tipte olmayan geleneksel güç kaynakları 3) Nükleer gücün EY-BSR'lerle yenilendiği, Enerji Yükselticinin ürettiği toplam gücün fonksiyonu.

5. PSI'DAKİ MEGAPIE PROJESİ

MEGAPIE, 1 MW seviyesinde demet gücünde sıvı kurşun bizmut hedefte spallasyon uygulamasının yapılabilirliğinin PSI (İsviçre), Cadarache (Fransa) ve Forschungszentrum Karlsruhe (Almanya) çalışma gruplarının inisiyatifinde uluslararası bir kanıtlama işbirliği çalışmasıdır. Öyle bir hedef ki dünyadaki geniş nükleer transmutasyon ve diğer uygulamalarda kullanılacak hızlandırıcı sürücü sistem (ADS) tasarımı incelemesidir. Nötron saçılması için spallasyon nötron kaynağı SINC'da termal nötron flux olabilirliği artan bir potansiyele sahiptir. SINC'nun demet gücü kapanana kadar daima 1 MW'dır, bu tesis tek elverişli deneysel gerçekleştirme sunmakla birlikte yeni yardımcı sistemleri denemeye olanak sağlamaktadır [21].

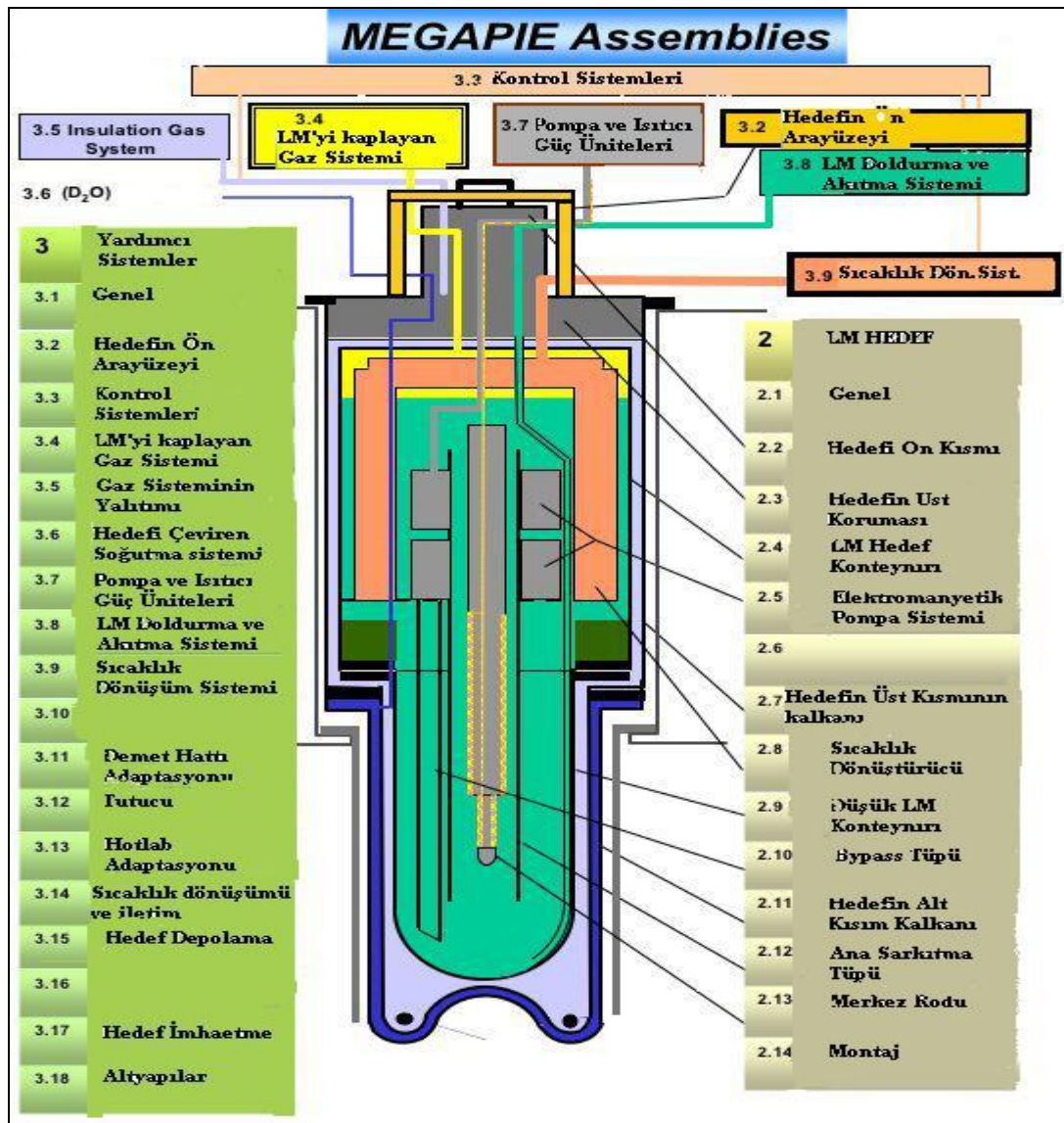
MEGAPIE uygulaması önemli malzemeleri belirleyecek ve sonraki yeni adım olan ADS için hızlandırıcı artı hedeften radyasyonun yönlendirilmesi artı düşük güçte kritik altı battaniye çalışmalarını başlattıracaaktır.

Bu uygulamada amaç bulunanların koşulları altında lisanslama yapabilmek, sıvı kurşun bizmut hedeflerin bir tasarım datası biriktirmek, günümüz şartları altında çalışan hızlandırıcı sisteminin kullanımı deneyimi kazanılmış olacaktır. Ayrıca, projedeki ayrılmaz parçaların çalışma sırasında ve sonrasındaki radyasyon davranışları tasarlandığı gibi geniş gözetleme sistemleriyle izlenecek. Geniş birincil radyasyon AR-GE programı hedefin en iyi şekilde kullanılarak güvenliğinin maksimuma çıkarılmasıdır.

Avrupa' da bir hedef uygulaması için yeterince yüksek proton demet gücüne sahip tek hızlandırıcı PSI'daki 590 MeV enerjili 1.8 mA sürekli akımla çalışan ve yakında 2 mA'e yükseltilecek olan dairesel hızlandırıcıdır. Bu hızlandırıcı geniş kullanım alanlarında bilimsel araştırmalar yapılabilen araçlara, çok önemli bir spallasyon nötron kaynağı (SINC) ile geniş farklı uygulamalar için kullanılmaktadır. Ayrıca, bu spallasyon kaynağında ağır koruma kalkanları, bir çok yardımcı sistem ve bu uygulamalar için çok fazla mali gücü mevcuttur [21].

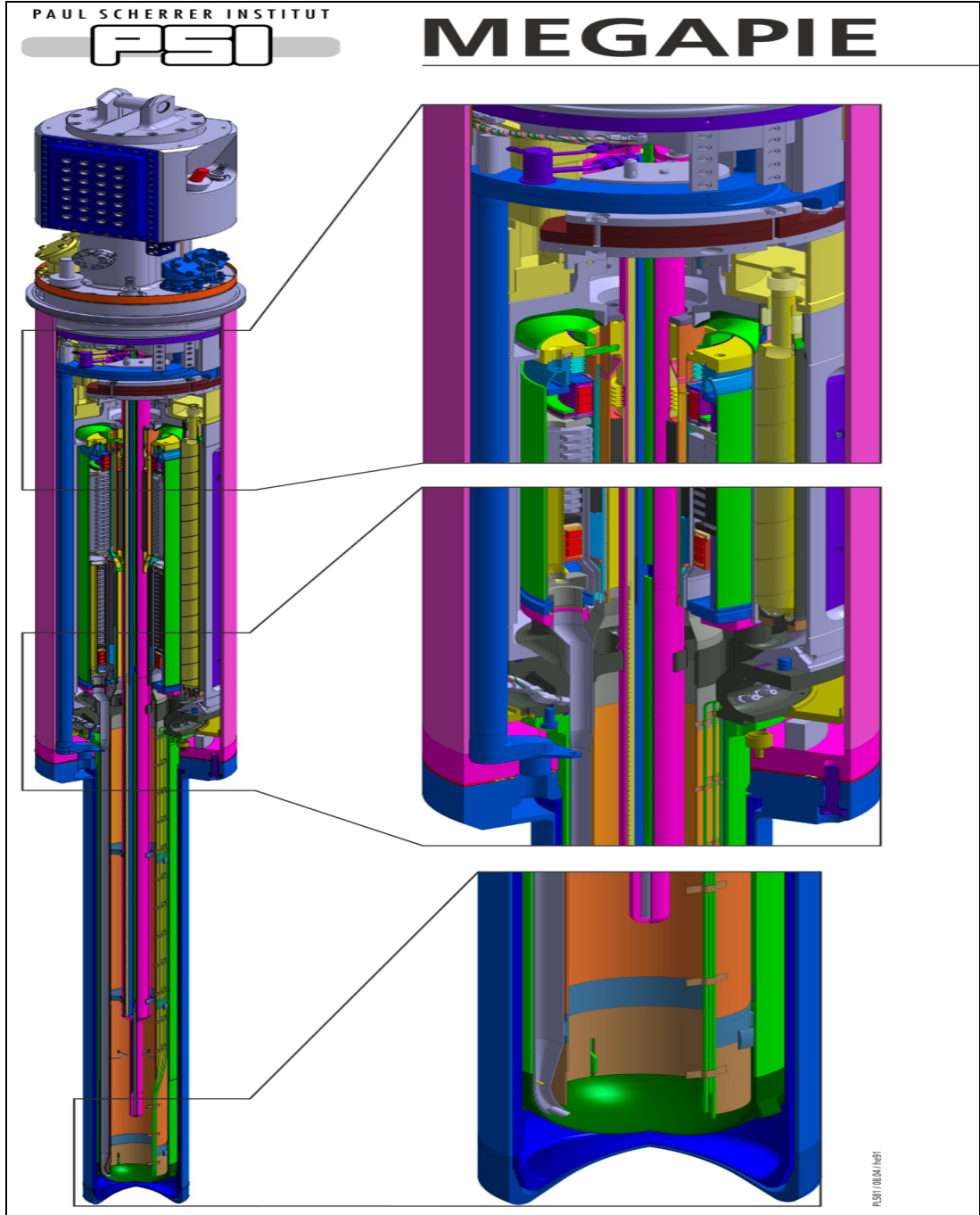
SINQ, ana araştırmalar için termal ve soğuk nötron çıkaran bir nötron kaynağı fakat izotop ve nötron aktivasyon analizi uygulamalarında da kullanılmaktadır [21].

MEGAPIE projesi farklı sebeplerden dolayı çalışma partnerlerinin ilgisini çekmiştir. SINQ uygulama düzeneğinin nötron üretim oranından dolayı ilgiler PSI'a odaklanmıştır. Uluslar arası komite, büyük transmutasyon deneyi inşası amacı ile büyük bir sıvı spallasyon hedef sonucu fizibilitesi çok önemlidir. Tüm partnerler için MEGAPIE'de elde edilen yeni malzemelerin bilgileri, yapısal, ısısıl, sıvı-metal ve radyasyon etkileri sonuçlarını eşzamanlı birleştirmeleri çok önemlidir [21].



şekil 5.1. MEGAPIE'nin genel görünümü.

MEGAPIE (MEGAwatt Pilot Experiment), altı Avrupalı araştırma enstitüsü ve Japon JAERİ'nin inisiyatifinde tasarım, inşa, çalıştırılma ve bir sıvı kurşun-bizmut spallasyon hedef için 1 MW'lık demet gücünde çalıştırılabilen PSI'daki nötron spallasyon çalışması yapan SİNQ'da yapılacaktır [21].



Şekil 5.2. MEGAPIE'nin üç boyutlu görünümü.

Temelde bir metal spallasyon hedef, maksimum erime yeteneğinde olan kurşun-bizmut karışımı (125°C altında erime noktası ve 1670°C 'nin üzerinde kaynama noktası) tasarlanan birçok çalışmada hızlandırıcılar kullanılarak kritik altı çalıştırılmasına toplanmıştır. Bu çalışmaların ana amacı uzun ömürlü radyoaktifleri kısa ömürlü hale getirmek , kısa ömürlüleri de tamamen imha etmek ki radyoaktif atıkların depolanması problemini çözmektir. Bununla birlikte günümüzde, bir hedefle çalışma yapılmamıştır. Tamamı spekülatif elementler olmakla beraber kanıtlama çalışmalarına bakılarak bu tasarımlarda değişiklikler yapılabilecektir [21].

1 MW sıvı metal testler sonucunda çok önemli hedef (sıvı yada katı) belirlenmiş olacak ve bir sonraki adıma geçilebilecektir.

5.1. PSI'da Sınır Şartları ve Fırsatlar

Paul Scherrer İstitüsündeki büyük araştırma kompleksinde bir birini destekleyen üç hızlandırıcı ile proton demeti 590 MeV enerjili 1 ,8 mA akımdadır. Şekil 2 de görülen kat planıdır. Proton demeti birincil hızlandırıcı Cockroft- Walton ile 800 keV'e ve 4 bölümlü injektör siklotronla 72 MeV enerjiye getirilmektedir. Son hızlandırma 590 MeV'e kadar 8 bölümlü ana dairesel siklotronda olur. Demet koruma tünelleri ile uygulama istasyonlarına gönderilir. Demetin küçük bir kesir (20 μA) erkenden proton irradiation ve kanser terapi uygulamaları için bölünür. Ana demet iki pion hedeften (M ve T) geçer, onun vasıtasıyla demet enerjisi 575 MeV'e iner. Demet hedef E'den geçtikten sonra demet durdurucusunda yada yakalanamayanlar, ileri iletim için aşağı yönde eğilenler SinQ nötron spallasyon kaynağına gönderilirler.

Hedef E, demetin bazı saçılmalarından dolayı 4 cm uzunluğunda grafitir. Bu hedeften sonra akımın 2/3'ü yakalanmayan ve SinQ hedefine iletilenlerdir. SinQ'da yakınlarda demet gücü kabaca 0.7 MW'dır ve MEPAPIE hedefi için 2004 yılında 1 MW olması planlanmıştır [21]. Fakat 2006 yılında ilk deneysel çalışmaya başlanabilmiştir.

5.2. SinQ Spallasyon Nötron Kaynağı ve Yardımcı Donanımlar

SinQ bir nötron kaynağı soğuk ve termal nötron demeti çıkışıyla yapılan ana araştırmalar için fakat izotop üretimi ve nötron aktivasyon analizi çalışmaları da yapılmaktadır. Nötron demetleri 2 m çapındaki ağır su moderatörü ile çevrelenmiştir Şekil 5.2.'de SinQ'ya demet injeksiyonu alt taraftandır, hedef yukarıdan sokulmakta, hedefi koruma bloğunun kenarından sarkıtılmaktadır. Demetin etkilkeşme bölgesinde hedef sadece yaklaşık 30 cm uzunluğundadır, hedef ünitesi 4 m uzunluğunda yapı ile 2 m den az kısmı 20 cm çapında diğer yarısında ise 40 cm çapındadır. Bu boyutlar MEPAPIE hedefe yapışık olmalıdır [21].

Hedef katı rodlardan ve etrafında bulunan ağır su soğutma sisteminden oluşmaktadır. Temel olarak, düzenli yüksek nötron akısı için hedef bölgesinde minimum nötron absorpsiyonu amaçtır. Moderatör tanka uzatılan hedef ünitesinin parçaları ağır suyla doldurulmuş rod yığınının dışında tutulmaktadır(40 cm uzunluğunda ve moderatör tankın merkezine yerleştirilmiştir). Yarısına kadar indirilen hedef ünite duble koruma kabuğu ile ayırıcı ağır su soğutmasına koyulur. Bu kabuk alüminyumdan yapılmıştır [21].

Hedefin su soğutma halkası sıvı yada katı metal hedef için çok iyi ısı çevirim kapasitesine sahip olmalıdır.

Hedef özel tasarlanan hareket ettirilebilen bir düzenek içerisinde bulunur. Bu düzenek taşıma kapasitesi 60 ton olan bir vinçle yukarıya doğru çıkartılır. Düzenegin halen kullanılan koruma kabı radyoaktivitesi en alt düzeyde olan katı hedefler için optimize edilmiştir. Sıvı metal hedefin spesifik aktivitesi katı hedefe oranla daha az olmasına rağmen düzenegin üst kısmındaki kaplama yeterli olsa bile tekrar gözden geçirilmelidir.

5.3. ATEC Aktif İşleme Alanı

SINQ nötron giriş holünün hemen bitişiğinde bulunan PSI uygulama bölgesindeki alan dizayn edilmiştir ve büyük radyoaktif bileşenler elle donatılmış, genellikle deneysel çalışmalar da kullanılan radyoaktif parçaların yerleştirilmek için

hazırlanması ve tamirinde kullanılması planlanmıştır. Sıcak çekirdeği bir güç manipülatörü ile donatılmış ,yönetici manipülatörler ve hareket etmeden çalışan birçok bileşenden oluşmaktadır (radyasyon monitörü, video kameralar ,v.s.). 1 ve 2 numaralı SINQ hedefleri başarılı bir şekilde sökölüp çekirdekte yok etmek için hazırlanmıştır [21].

Çizelge 5.1. MEGAGIE projesinin fazları ve yol haritası

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Faz 1(Kasım 99-Şubat 00)	Temellendirme						
03.Mar.00	MoA girişi, LiSoR için tahsis araştırması						
Faz 2(Mart 00-Mayıs 00)	Fizibilite Çalışması						
Faz 3(Haziran 00-Eylül 00)	Konsept Dizaynı						
Faz 4(Ekim 00- Eylül 01)	Mühendislik Dizaynı						
30.Mar.01	PSAR'ın tamamlanması						
15.Eyl.01	İnşaatın kararının alınması						
Faz 5(Ekim 01-şubat 03)	Detaylı dizayn ve ihalesi						
Faz 6(Mart 03-ocak 04)				Sistem integrasyonu ve testler			
15.Oca.04	MEGAPIE'nin çalıştırılması ve PIE'nin bulunması						
Faz 7(Mart 04-Ağustos 04)				Çalıştırılma			
Faz 8(Mart 04-Eylül 06)				PIE ve ayırma			

5.4. Sınır Koşulları

Hedef ve onun işletilmesi anlaşılabilir, öyle ki SINQ Uygulama bölgesinde faydalanılabilir α - kirliliğinin altında olmalıdır. Hedef dizaynı günümüzde çalışan SINQ hedefi temelli olmalı ki güvenlik sistemleri de kısmen aynı olmalıdır. Çift koruma kalkanı materyallerin radyoaktif patlamaları ve diğer potansiyel patlamalara karşı korumalıdır [21].

5.5. Termal Hidrolik

Isı değiştiricisinin ikinci tarafındaki basınç seviyesi, basınç dūřuřu ve sıcaklık seviyesi soğutma devresindeki var olan değerler içinde olmalıdır. Őuan ki soğutma devresinin çalışma parametreleri tablodaki gibidir [21].

Çizelge 5.2. Soğutma devresinin parametreleri.

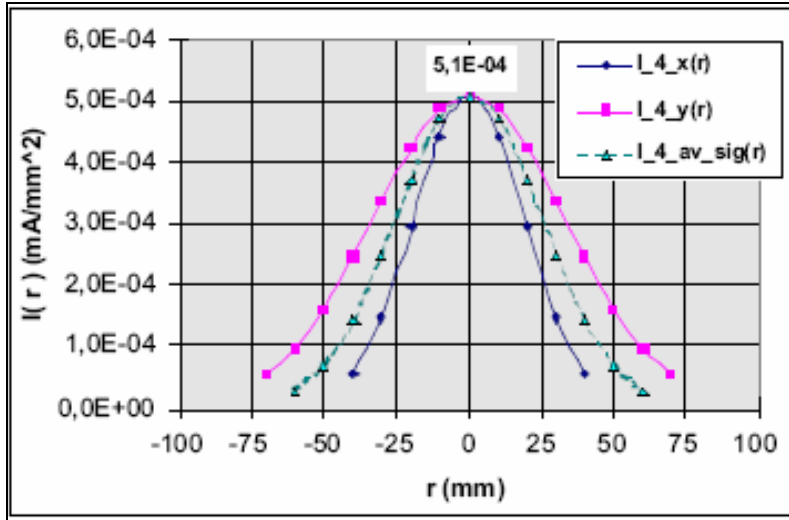
Parametre/Devre	Hedef	Hedef Kaplaması	Moderatör	Koruma Zırhı
Orta	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O
Öne Akış Sıcaklığı (°C)	34	34	32	33
Geri Akış Sıcaklığı (°C)	43	35	36	35
Ön Akış Basıncı (Mpa psa)	0.7-1.1	0.7-1.1	0.35	0.4
Geri Akış Basıncı (Mpa psa)	0.5	0.5	0.2	0.2
Kütle Akışı (kg/sn)	10(-15)	2.2	3.1	7.2
Bypassla Arındırma (kg/sn)	0.4	0.08	0.55	0.28
Soğutma Hacmi (litre)	3400	460	5710	2480
Yaklaşık Gerçek Güç (kW)	375	7	60	55
Nominal Güç (kW)	650	35	111	210

5.6. Proton Demeti

Hedef, 1 MW gücünde ve 575 MeV enerjili proton demeti için tasarlanmıştır. Yani toplam demet akımı I₀=1.74 mA ‘dir. SINQ’daki 4 cm kalınlıktaki E hedefi için elde edilen değerler gibi hedefteki demetin gauss yoğunluğuyla verilen eliptik dağılımı için verilen parametreler $\sigma_x = 19mm$ ve $\sigma_y = 33.1mm$ ile verilir. Gausiyenler yerine $c^* \sigma$ alınarak (c=2) x ve y yönündeki demet dağılımı için;

$$I_{x,y} = I_0 \frac{e^{-(r_{x,y}/\sigma_{x,y})^2/2}}{(2\pi\sigma_x\sigma_y(1 - e^{-(c^2/2)}))}$$

hesaplama kısmında σ ’nın ortalama değeri için 25.08 mm kullanılmalıdır. Grafikte demet yoğunluk dağılımının hedef kalınlığına bağlı değişimi verilmiştir [21].



Şekil 5.3. 1 MW gücündeki MEGAPIE hedefinin demet yoğunluğu dağılımının hedef kalınlığına göre değişimi.

5.7. Nötronik

MEGAPIE sıvı hedefler için tasarlanmış olsa da SINQ'nun çalışması süresince nötron üretim hedefi olarak da kullanılabilir. Bu sebeple oluşacak nötron akısını optimize edecek şekilde reflektör dizayn ve inşa edilmesi gerekir. Bu reflektörün içindeki kısımlarda olduğu kadar hedefin çapıyla da ilgilidir. Burada düşük termal nötron absorpsiyonu olan elementler tercih edilmelidir ve yüksek absorpsiyonu olan elementler kullanılmamalıdır [21]. Örnek olarak;

“Mükemmel” elementler ($\sigma_{abs} \leq 100mb$) : Be, C, D, O, F, He, Ne, Mg, Bi

“İyi” elementler ($100 \leq \sigma_{abs} \leq 500mb$) : Si, P, Zr, Pb, H, Al, Ca, Rb

“Tolere edilebilir” elementler ($500 \leq \sigma_{abs} \leq 1000mb$) : Na, S, Ar, Ce, Sn,

“Sakıncalı” elementler ($1000 \leq \sigma_{abs} \leq 5000mb$) : N, Ba, Cr*, Cu, F, Ga, Ge, Fe*, Ni*, Nb, Ti, V,

“Kötü” elementler ($\sigma_{abs} \geq 5000mb$) : Sb, B, Cd, Cl, Co, In, I, Ir, Au, Hf, Li, Mn, Hg, Mo, Pt, Re, Rh, Se, Ag, Ta, W, Xe

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırmanın amacı Türk Hızlandırıcı Kompleksi (Turkic Accelerator Complex-TAC) projesi çerçevesinde GeV enerjili proton hızlandırıcısıyla ilgili yapılan çalışmalara ışık tutmaktır. TAC projesinin gerçekleştirilmesi için kurulacak ulusal hızlandırıcı merkezinin yapılanmasında PSI gibi dünyanın öncül merkezlerinin deneyiminden yararlanılması göz ardı edilmemelidir. TAC proton hızlandırıcısının, ikincil demetlerin ve deney istasyonlarının projelendirilmesinde PSI'daki benzer yapılar göz önünde tutulmalıdır. Özellikle ülkemizin enerji probleminin çözülmesine önemli katkı sağlayacak hızlandırıcı sürümlü sistemlerle (ADS) ilgili araştırmalar TAC projesinin ana hatlarından birini oluşturmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Amaldi U., The Importance of Particle Accelerators, *7th European Particle Accelerators Conference, EPAC 2000*, Wien, Austria, 58-65 (2000).
2. Sultansoy, S., “Parçacık Hızlandırıcıları: Dün, Bugün, Yarın”, *UPHUK1*, TAEK, Ankara, 7-15, (2001)
3. Sultansoy, S., “ Türk Hızlandırıcı Kompleksi Genel Tasarımı” *DPT’2002K120250 nolu DPT projesi Fizibilite Raporu*, 90-97 (2004)
4. Sultansoy, S., “ Türk Hızlandırıcı Kompleksi Genel Tasarımı” *DPT’2002K120250 nolu DPT projesi Sonuç Raporu*, 95-112 (2006)
5. Foroughi,F., “ π M1 secondary beam line”, *PSI Annual Report*, Kasım, 65-68 (1997)
6. Foroughi,F., “ π M3 secondary beam line”, *PSI Annual Report*, Kasım, 69-76 (1997)
7. Foroughi,F., “ π E1 secondary beam line”, *PSI Annual Report*, Kasım, 77-83 (1997)
8. Foroughi,F., “ π E3 secondary beam line”, *PSI Annual Report*, Ekim, 34-39 (1997)
9. Foroughi,F., “ π E5 secondary beam line”, *PSI Annual Report*, Ekim, 40-45 (1997)
10. Foroughi,F., “ μ E1 secondary beam line”, *PSI Annual Report*, Ekim, 46-51 (1997)
11. Foroughi,F., “ μ E4 secondary beam line”, *PSI Annual Report*, Ekim, 52-58 (1997)
12. “ The Neutron Source SINQ”, *PSI General Report*, 42-44 (2000).
13. Rubai, C. Et al., “A High Intensity Accelerator for Driving the Energy Amplifier for Nuclear Energy Production”, *4th EPAC*, London, 270-272 (1994)
14. Rubbia, C., et al., “Conceptual Design of A Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier”, *International Conference on Accelerator- Driven Transmutation Technologies and Applications*, Las Vegas, 1-6 (1994)
15. Andriamonje S. et al., *Physics Letters B 348*, 697-709 (1995)

16. Jumeson R.A., “Accelerator-driven transmutation technology for energy-production and nuclear-waste treatment1, *3rd European Particle Accelerator Conference*, Berlin, 988-1005 (1992)
17. Rubbia, C., “A High Gain Energy Amplifier Operated with Fast Neutrons”, *International Conference on Accelerator - Driven Transmutation Technologies and Applications*, Las Vegas, July 123-140 (1994)
18. Iazzourene, F.” Linear Beam Dynamics in The Superconduction Linear Accelerator of The Energy Amplifier”, *IEEE*, 1185-1188 (1998)
19. Tichelen K.V., Kupschus P., Abderrahim H.A., “The MYRRHA windowless target –R&D on Thermohydraulics”, *SCK.CEN Annual Report*, 49-55 (2002)
20. Barashenkov V.S., Polanski A., Puzynin I.V., “ ADS’s Based on the 660 MeV proton phasotron of JINR for research on utilization of plutonium.”, *Tenth Conference on Emergening Nuclear Energy Systems (ICENES 2000)*, *Holland*, 221-228 (2000)
21. Bauer G.S., et al., “ MEGAPIE, a 1 MW Pilot Experiment for a Liquid Metal Spallation Target”, *proc. IWSMT-4(J. Nucl.Mat.) and Proc. ICANS 15(JAERI-KEK report)*, 3-8 (1998)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BİLGİN, Pehlül Serkan

Uyruğu : T.C

Doğum tarihi ve yeri : 25.02.1978 Kırıkkale

Medeni hali : Bekar

Telefon : (0505) 662 63 57

e- mail : psbilgin@hotmail.com

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü	2006
Lisans	Ankara Üniversitesi / Fizik Bölümü	2003
Lise	Kırıkkale Lisesi	1994

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Fizik, Bilim Tarihi, Satranç, Tenis