

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
Im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

www.ifj.edu.pl/reports/2005.html

Kraków, grudzień 2005

Raport Nr 1975/AP

**PRZYSTOSOWYWANIE CYKLOTRONU AIC-144
DO ZASTOSOWAŃ MEDYCZNYCH**

CZĘŚĆ 1.

Optymalizacja nastaw

Krzysztof Daniel, Henryk Doruch, Bogdan Lipka,
Tadeusz Norys, Jacek Sulikowski, Artur Sroka

Abstrakt: The AIC-144 cyclotron at the Institute of Nuclear Physics has been upgraded to produce the beams, which could be applied for proton radiotherapy of eye melanoma. Acceleration, extraction and transport of the 56 MeV proton is described.

Spis treści

1. Wstęp	3
2. Akceleracja wiązki protonów wewnątrz komory cyklotronu	3
3. Ekstrakcja wiązki protonów z komory cyklotronu	7
4. Prowadzenie wiązki protonów na stanowisko terapii	10
5. Energia doprowadzonej wiązki protonów	12
6. Uwagi końcowe	14
7. Literatura	14

1. Wstęp

Cyklotron AIC-144 znajdujący się w Dziale Cyklotronowym Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie został zbudowany do przyspieszania protonów, deuteronów i cząstek alfa. W tabeli 1 [6] przedstawiono zakresy energii i prądów wiązki uzyskiwane w cyklotronie dla poszczególnych typów przyspieszanych cząstek.

Tabela 1. Parametry cząstek przyspieszanych w cyklotronie i wyprowadzanych poza komorę akceleracji (niektóre z podanych wartości są szacunkowe).

Rodzaj cząstki	Zakres energii	Prąd wiązki wewnętrznej	Prąd wiązki zewnętrznej
protony	20 do 45 MeV	100 μA	10 μA
	ponad 45 do 60 MeV	10 μA	1 μA
deuterony	15 do 30 MeV	100 μA	20 μA
cząstki α	30 do 60 MeV	15 μA	5 μA

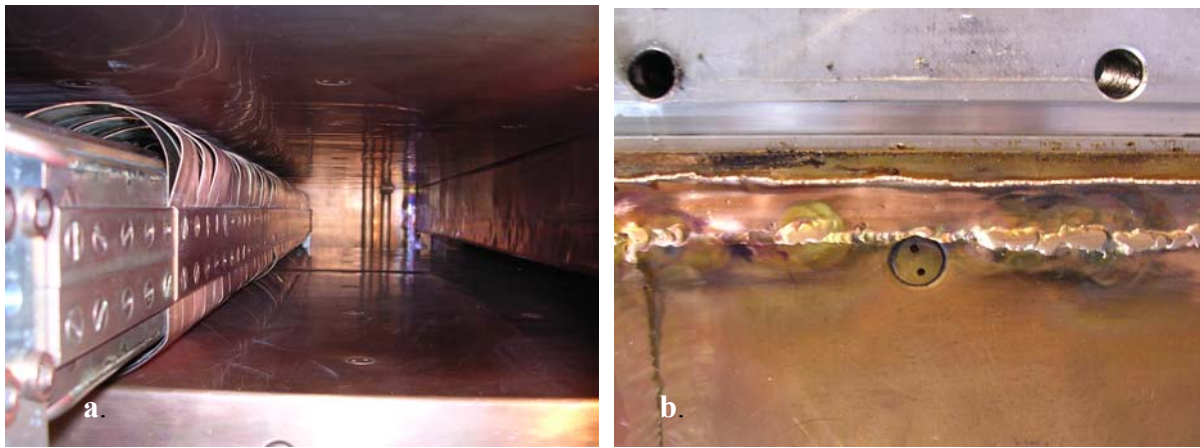
W latach 2004 -2005 cyklotron AIC-144 został zmodernizowany i przystosowany do zastosowań medycznych [1], [5]. Adaptacja polegała na modyfikacji parametrów pracy cyklotronu tak, aby umożliwić przyspieszanie protonów do energii bliskiej 60 MeV. Zbudowano też trakt wiązki zdolny do doprowadzenia przyspieszonych protonów do budowanego w IFJ stanowiska radioterapii protonowej nowotworów oka.

2. Akceleracja wiązki protonów wewnątrz komory cyklotronu

Wiosną 2005 roku przeprowadzono modernizację elementów cyklotronu, która umożliwiła wytworzenie wewnętrznej wiązki protonów o energii nominalnej 60MeV. Wykonane prace pozwoliły na wyprowadzenie wiązki z komory i doprowadzenie jej na stanowisko terapeutyczne. Najważniejszymi etapami pracy było:

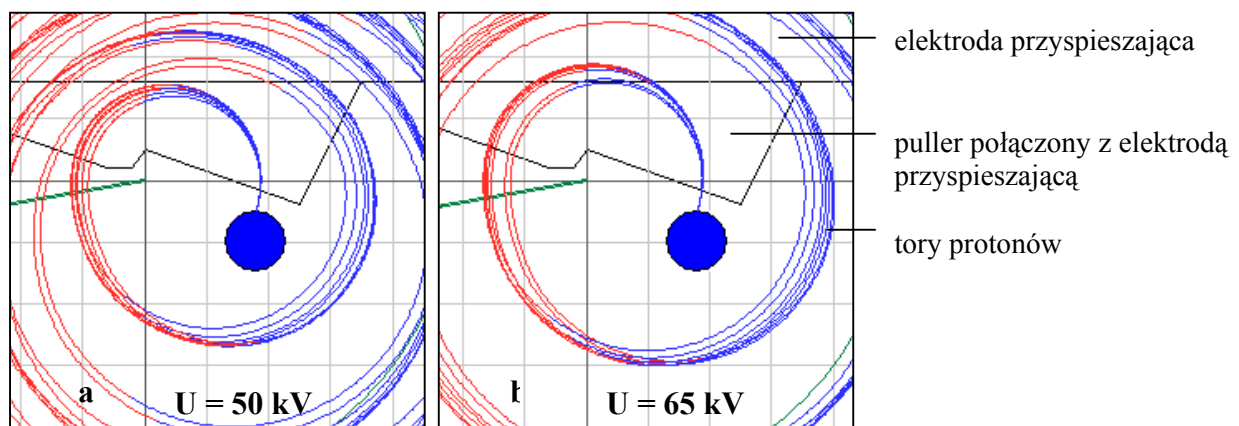
- a. Zwiększenie wartości napięcia na elektrodzie przyspieszającej.
- b. Poprawienie symetrii pola magnetycznego wewnątrz komory akceleracji.
- c. Zwiększenie dostępnej wysokości komory akceleracji i umożliwienie zastosowania nowego źródła jonów [2].
- d. Wykonanie pomiarów pola magnetycznego.

Modernizacja systemu wysokiej częstotliwości, polegała na zmniejszeniu rezystancji styków w komorze akceleracji, w rezonatorze oraz w komorze łączącej rezonator z komorą akceleracji. Zamierzone cele uzyskano przez zespawanie styków oraz poprawienie siły docisku i wyczyszczenie styków w miejscach, gdzie spawanie było niemożliwe. Na rysunku 1 przedstawiono zmodernizowane połączenia w systemie wysokiej częstotliwości cyklotronu. Zmniejszenie rezystancji styków dla prądów wysokiej częstotliwości poskutkowało zmniejszeniem strat mocy o 50% i wzrostem amplitudy napięcia wysokiej częstotliwości na elektrodzie przyspieszającej z około 50 kV do 65 kV.



Rys. 1 Styki w elementach systemu wysokiej częstotliwości.
 a. Fragment wnętrza rezonatora wysokiej częstotliwości z widocznymi stykami.
 b. Połączenie spawane w rezonatorze wysokiej częstotliwości.

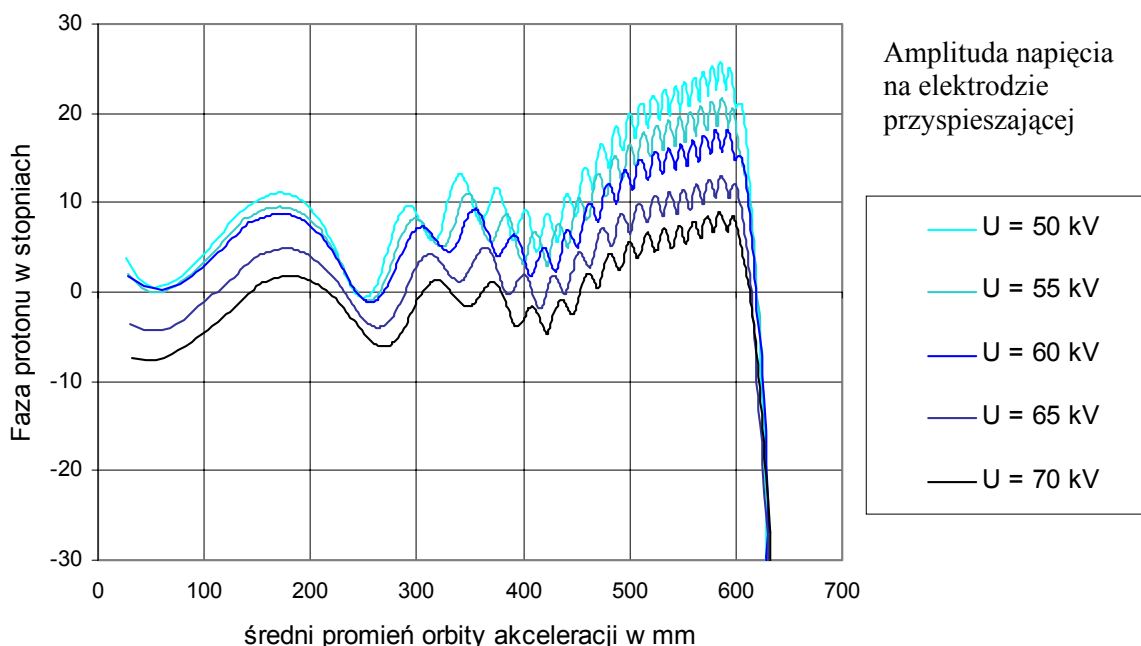
Większe napięcie przyspieszające umożliwiło zwiększenie promienia toru na pierwszej orbicie i poruszanie się protonów wiązki po torach spiralnych, bardziej symetrycznych względem centrum komory akceleracji. Na rysunku 2 przedstawiono symulację przebiegu akceleracji wiązki protonów w centrum komory dla amplitudy napięcia $U = 50$ kV (przed modernizacją) i dla amplitudy $U = 65$ kV (po modernizacji). Przeprowadzone symulacje potwierdzają znaczące zmniejszenie zniekształcenia toru wiązki przy wzroście napięcia U .



Rys. 2 Symulacja przebiegu przyspieszania wiązki protonów do energii 60 MeV. Widoczny fragment centrum komory akceleracji, siatka co 1 cm, grubszymi liniami zaznaczono osie przechodzące przez centrum komory. Przedstawiono tory protonów wychodzące ze źródła co 10 stopni względem fazy napięcia U . a – stan przed modyfikacją, b – stan po modyfikacji.

Uzyskany wzrost napięcia przyspieszającego spowodował zwiększenie przyrostu energii protonu o 30% podczas każdego okrążenie centrum akceleracji. Skutkiem tego, protony zostają przyspieszone do zadanej energii po wykonaniu mniejszej ilości okrążeń. Mniejsza ilość cykli akceleracji zapewnia zwiększenie odporności procesu akceleracji na odchyłki rzeczywistego pola magnetycznego od idealnego pola izochronicznego. Na rysunku 3 przedstawiono symulację wpływu amplitudy napięcia przyspieszającego na izochronizm procesu akceleracji. Ponieważ przyspieszanie protonu jest wykonywane przez napięcie równe $U \cdot \cos(\text{faza protonu})$, pożądana wartość fazy wynosi 0, na orbitach, na których występuje

akceleracja. Na rysunku 3 jest widoczny wpływ zwiększania amplitudy napięcia przyspieszającego U , na zbliżanie się procesu akceleracji do pożądanego tj. bardziej poziomego kształtu zależności fazy od promienia.



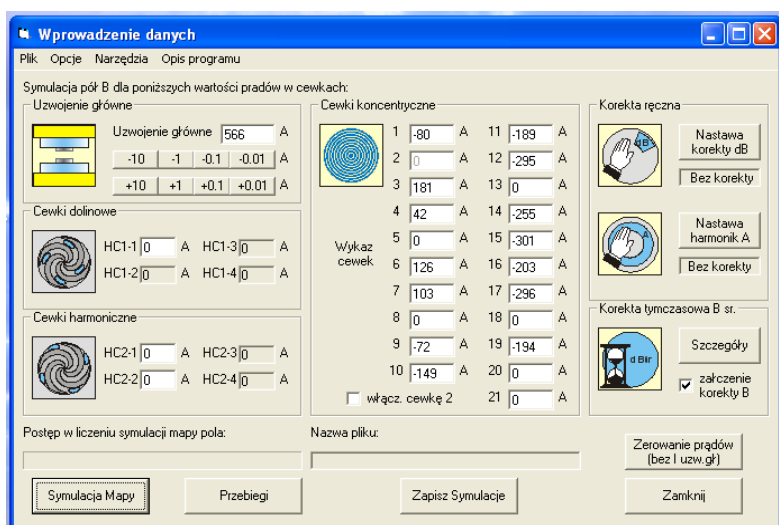
Rys. 3 Symulacja akceleracji protonów do energii 60 MeV dla różnych amplitud napięcia przyspieszającego. Faza protonu oznacza kąt między rzeczywistym położeniem geometrycznym protonu względem centrum akceleracji, a miejscem, w którym powinien się znajdować proton, aby przyspieszanie było maksymalne.

Przyspieszanie protonów do energii 60 MeV wymaga wytworzenia w komorze akceleracji pola magnetycznego o jakości maksymalnie zbliżonej do idealnego pola izochronicznego. Przebieg akceleracji przed modernizacją oraz przeprowadzone pomiary, wykazały wystąpienie niekorzystnych zmian w nabiegownikach kształtujących pole magnetyczne. W celu przywrócenia prawidłowego pola magnetycznego w komorze cyklotronu, przeprowadzono korektę nabiegowników (rys. 4). Poprawiono mocowanie żelaznych segmentów nabiegowników oraz wykonano symetryzację pola magnetycznego. Po korekcie elementów nabiegowników wykonano kontrolne pomiary pola magnetycznego w komorze akceleracji, które w połączeniu z danymi z wcześniejszych obmiarów, pozwoliły na symulacje pól magnetycznych. Na rysunku 5 pokazano widok okna głównego programu do symulacji pól SymMap2 [3].

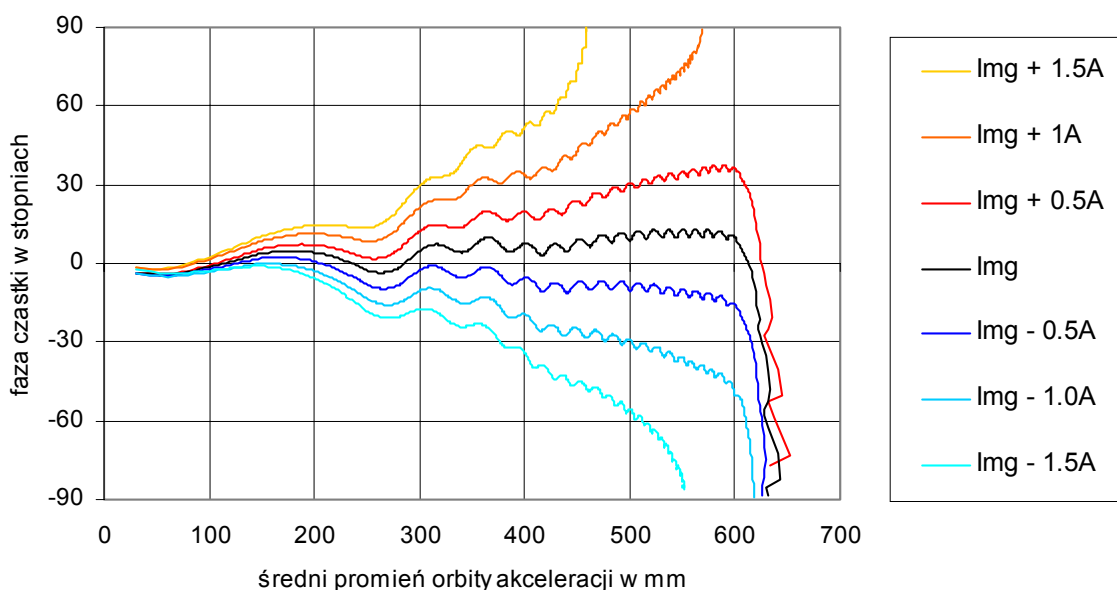


Rys. 4 Widok górnego nabiegownika, kształtującego pole magnetyczne w komorze akceleracji.

Dobra znajomość pola magnetycznego w komorze akceleracji, umożliwia wyliczenie torów przyspieszanych jonów i niektórych istotnych parametrów akceleracji, takich jak energia, faza, kierunek ruchu protonu w dowolnym punkcie na płaszczyźnie akceleracji. Wyliczenia te umożliwiają np. dobór nastaw prądów w cewkach magnesu głównego oraz wyznaczenie wpływu i wielkości zmian wybranych parametrów pracy na jakość akceleracji. Na rysunku 6 pokazano przykładowe wyliczenie wpływu zmiany prądu w uzwojeniu głównym na fazę przyspieszanych cząstek. Symulacja pokazuje tolerancję procesu akceleracji na wartość prądu w uzwojeniu głównym, mającym dominujący wpływ na pole magnetyczne, gdzie I_{mg} oznacza prąd bazowy, konieczny do wytworzenia pola izochronicznego. Z rysunku widać, że możliwa jest akceleracja przy zmianie prądu nawet o 1,5 A. Dla podanego przykładu uzyskano dobrą zgodność z eksperymentem. Potwierdzono tym samym zgodność obliczeń z pomiarem oraz fakt, iż wytworzone pole jest izochroniczne.



Rys. 5 Program SymMap2 do symulacji składowej pionowej indukcji magnetycznej wewnątrz komory akceleracji w cyklotronie AIC - 144.

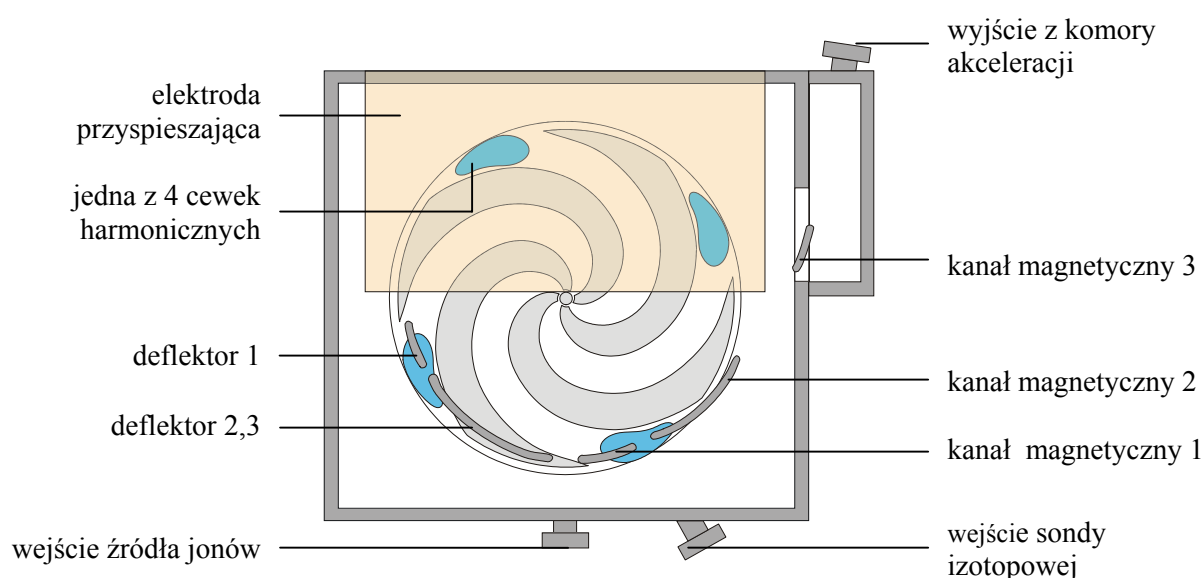


Rys. 6. Symulacja akceleracji protonów dla energii 60MeV i amplitudy napięcia przyspieszającego $U = 65$ kV.

3. Ekstrakcja wiązki protonów z komory cyklotronu

Do wyprowadzenia wiązki protonów o energii 60 MeV, na zewnątrz komory służy układ ekstrakcji przedstawiony na rys. 7. Ekstrakcja jest realizowana przez:

- Wymuszenie precesji wiązki na zewnętrznych orbitach tak, by część toru przebiegała na zewnątrz nabiegunników magnetycznych, w miejscach o słabszym polu magnetycznym. Służą do tego celu cewki harmoniczne oraz niewidoczne na rys. 7, elementy żelazne osłabiające pole w okolicy deflektorów.
- Deflektory elektrostatyczne.
- Kanały magnetyczne.



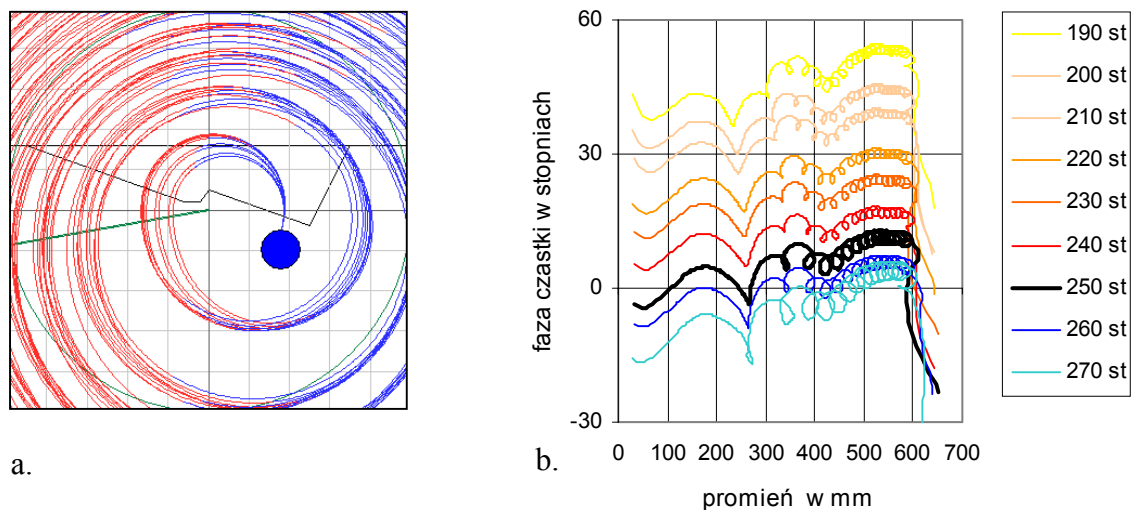
Rys. 7. Schemat układu ekstrakcji przyspieszonych cząstek w komorze cyklotronu (spirale magnetyczne wyznaczają miejsca o lokalnym większym polu magnetycznym).

Straty prądu przyspieszonej wiązki protonów, o energii 60 MeV, podczas przechodzenia przez układ ekstrakcji wiązki wynoszą:

- po deflektorze 1 około 50%
- po deflektorze 2 około 80%
- po kanałach magnetycznych 1, 2 i 3 około 90%.

Tak duże straty podczas ekstrakcji przyspieszonych protonów wymagały określenia przyczyn tego zjawiska i znalezienia sposobów przeciwdziałania. Aby protony mogły być akcelerowane, muszą być pobierane ze źródła w odpowiedniej chwili tj. muszą być w fazie z napięciem przyspieszającym. Wykonane obliczenia pokazały, że w cyklotronie AIC 144 protony mają możliwość akceleracji do promienia równego 620 mm, jeśli opuszczają źródło przy fazy napięcia od 190 do 270 stopni (rys.8). Ze względu na zależność toru zakreślonego przez przyspieszany proton od fazy napięcia w chwili rozpoczęcia akceleracji, do deflektora docierają protony poruszające się po torach różnego kształtu. Deflektory przepuszczają tylko część protonów, tj. te które mają odpowiedni kształt orbit, reszta protonów uderza w elementy deflektora. Silny wpływ na zróżnicowanie torów mają drgania protonów w płaszczyźnie poziomej (o kierunku prostopadłym do kierunku poruszania się protonów). Aktualnie

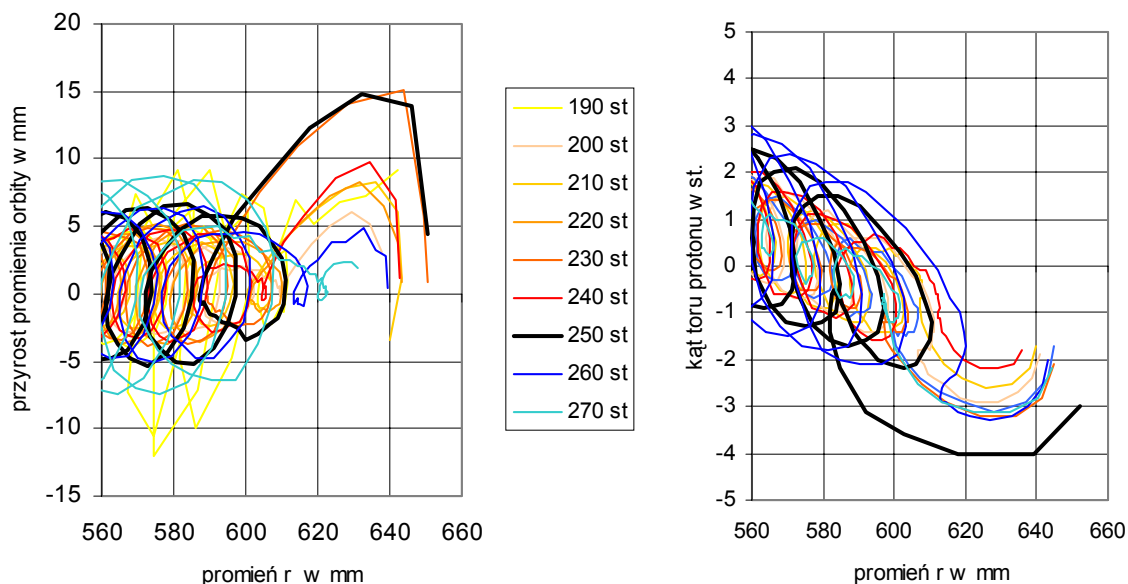
akcelerowane są protony o energii do 60 MeV ze znacznymi drganiami o amplitudzie do 5 mm. Powoduje to znaczne zróżnicowanie kształtów torów protonów (rys. 9), w konsekwencji deflektory przepuszczają tylko niewielką część przyspieszonych protonów.



Rys. 8 Symulacja akceleracji wiązki protonów o energii 60 MeV. Przedstawiono wyniki obliczeń dla protonów opuszczających źródło, przy fazach napięcia przyspieszającego od 190 do 270 stopni, co 10 stopni.

a: Widok centrum akceleracji (100 mm x 100 mm).

b: Faza protonu w zależności od promienia przechodzącego przez wejście do deflektora 1.



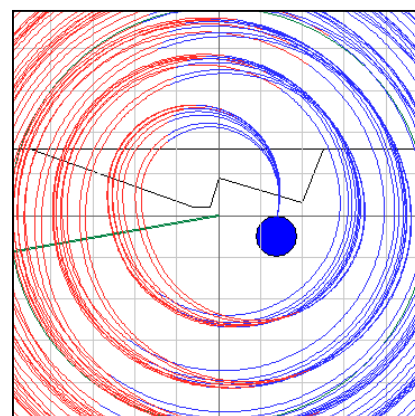
Rys. 9 Symulacja akceleracji wiązki protonów o energii 60 MeV. Przedstawiono przyrost promienia między następującymi po sobie orbitami protonów i kąt toru protonu względem stycznej do okręgu o promieniu r.

W wyniku przeprowadzonych symulacji akceleracji protonów, zaproponowano zmianę kształtu pullera (centralnej części elektrody przyspieszającej). Zmiana ta powinna spowodować przyspieszanie jedynie protonów na symetrycznych orbitach i tym samym wyeliminowanie lub znaczne zmniejszenia prostopadłych drgań protonów w płaszczyźnie

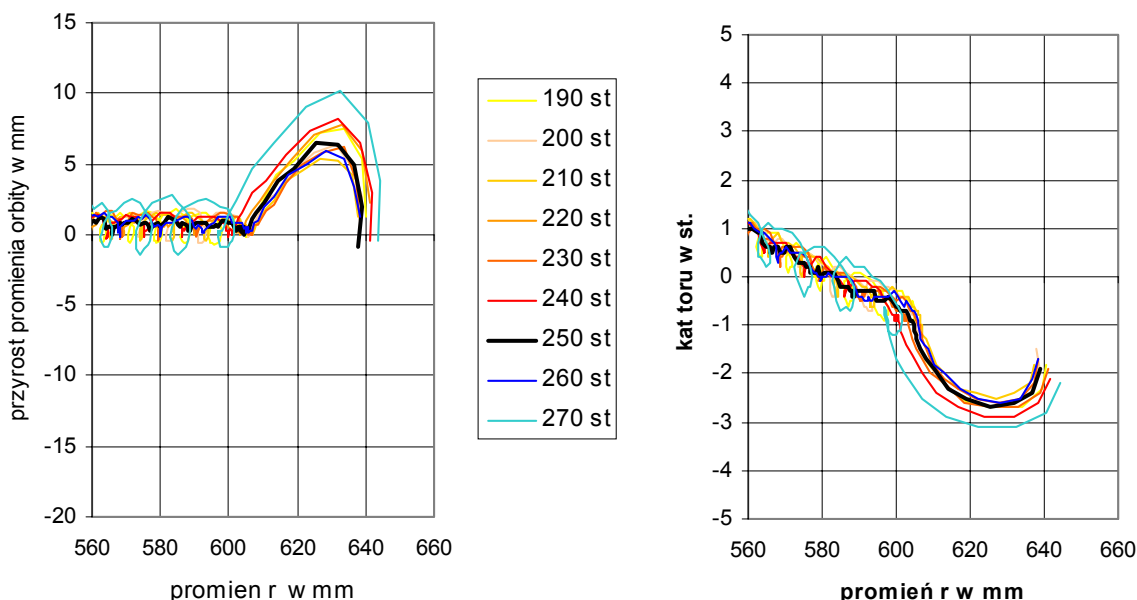
akceleracji. Porównanie kształtu początkowych orbit na rys. 8a (z aktualnym pullerem) z rys. 10 (z pullerem proponowanym) pokazuje możliwość wymuszenie toru symetrycznego, scentrowanego względem środka centrum akceleracji. Natomiast porównanie przyrostów promienia orbit i kątów ruchu protonów na rys. 9 (z aktualnym pullerem) z rys. 11 (z pullerem proponowanym) pozwala zauważyć jak proponowany puller ujednolica tory protonów i umożliwia tym samym ekstrakcję większej ilości protonów.

Dodatkowa poprawa sprawności ekstrakcji powinna nastąpić w wyniku zastosowania przesłon na pierwszej orbicie, umożliwiających dalszą akcelerację tylko tej części protonów które mogą być przeprowadzone przez deflektory [4], [2].

Zwiększenie sprawności deflektorów nabiera dodatkowego znaczenia, w kontekście zmniejszenia aktywacji elementów systemu ekstrakcji wiązki, co ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa obsługi cyklotronu.



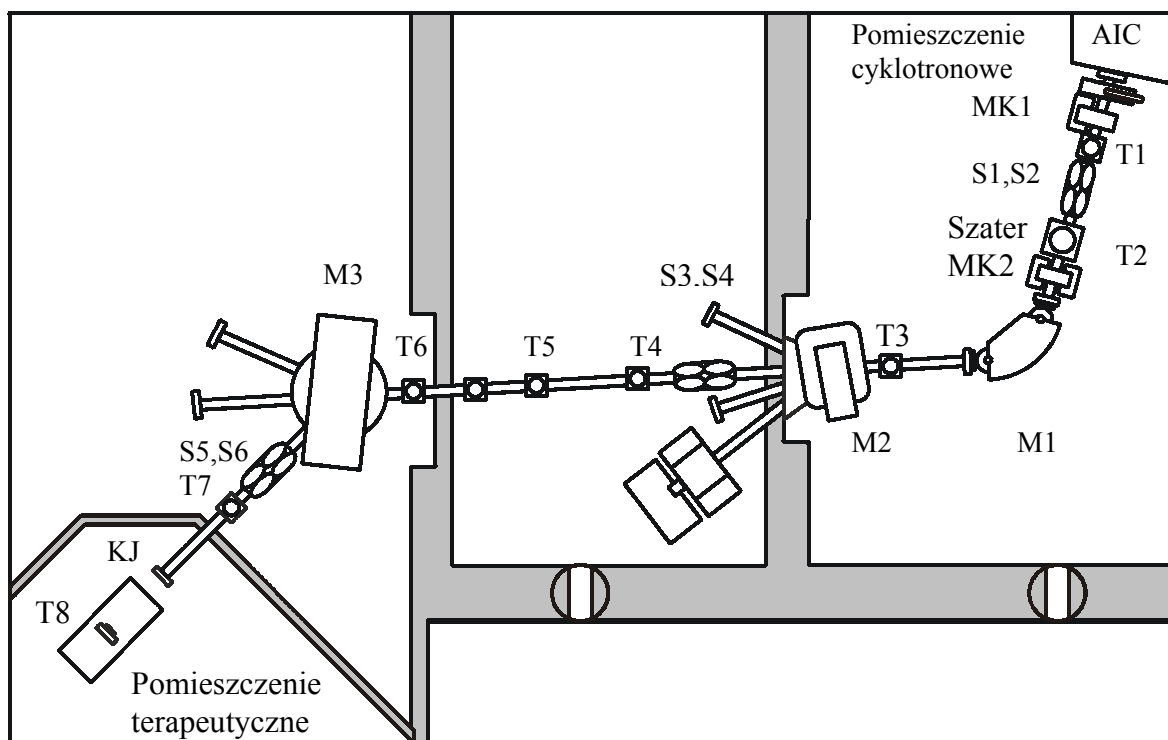
Rys. 10 Symulacja akceleracji wiązki protonów o energii 60 MeV. Widok centrum akceleracji (100 mm x 100 mm). Symulacja dla proponowanego pullera dostosowanego do energii 60 MeV.



Rys. 11 Symulacja akceleracji wiązki protonów o energii 60 MeV. Przedstawiono przyrost promienia między następującymi po sobie orbitami protonów i kąt toru protonu względem stycznej do okręgu o promieniu r . Symulacja dla proponowanego pullera dostosowanego do energii 60 MeV.

4. Prowadzenie wiązki protonów na stanowisko terapii

Modernizacja traktu wiązki protonów umożliwiła doprowadzenie wiązki protonów o energii 60 MeV na stanowisko terapeutyczne (rys. 12). W trakcie prac wykonano poziomowanie instalacji jonowodów, uproszczono układ traktu, założono tarcze pomiarowe i kamery telewizji przemysłowej.

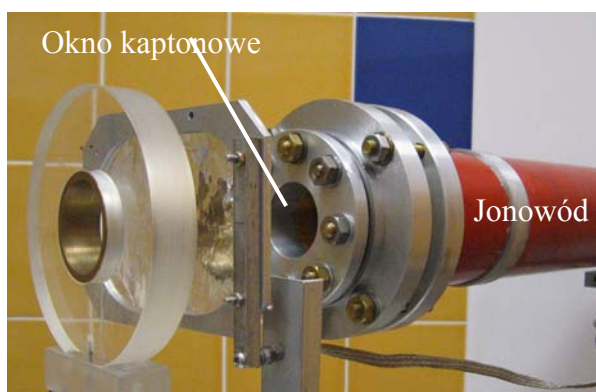


Rys. 12 Konfiguracja traktu jonowodów po modernizacji.

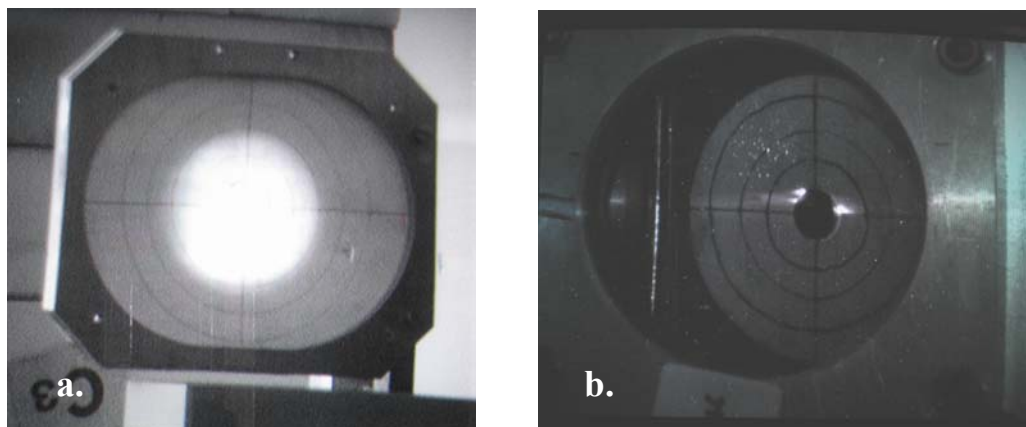
Główne elementy wchodzące w skład instalacji traktu:

- Szater - zawór odcinający część traktu
- S1 do S6 - soczewki magnetyczne (kwadrupole)
- MK1 i MK2 - magnesy korygujące kierunek wiązki protonów
- M1, M2 i M3 - magnesy zakrzywiające tor protonów
- T1 do T8 - tarcze pomiarowe, o średnicy około 10 cm
- KJ - końcówka jonowodu (rys. 13)

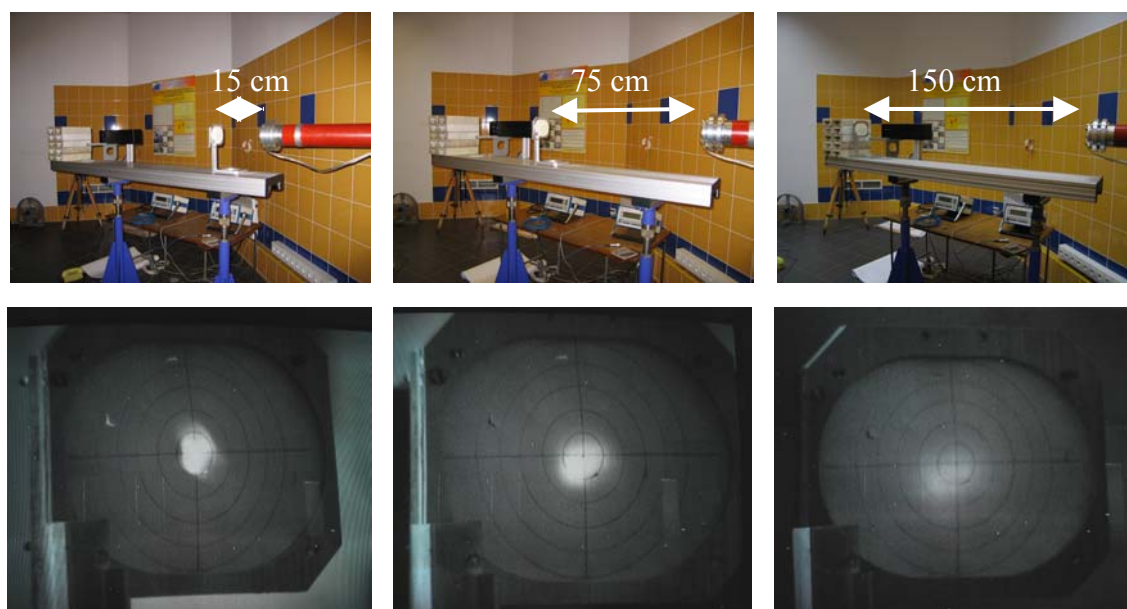
Rys. 13 Zakończenie traktu wiązki (oznaczone KJ na rys. 12), z oknem wyjściowym. Przyspieszone jony opuszczają jonowód przez okno kaptonowe o grubości 50 μm .



W dniu 21 kwietnia 2004 roku po raz pierwszy doprowadzono wiązkę protonów o energii około 45 MeV na stanowisko terapeutyczne. Po przeprowadzonej modernizacji, 13 maja 2005 roku energia doprowadzonej wiązki osiągnęła nominalne 60MeV (rys 14a). W późniejszym okresie polepszano parametry prowadzonych wiązki protonów (rys.14b i 15). Trwają prace nad dalszą poprawą parametrów wiązki protonów.



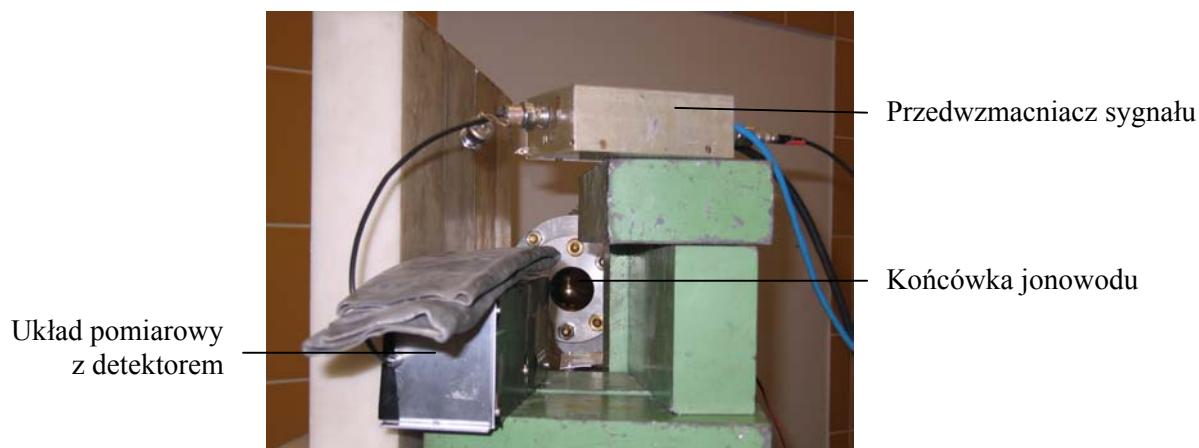
Rys. 14 Widok wiązki protonów na tarczy pomiarowej
a. – na tarczy T8, przed remontem instalacji traktu. Widoczne duże rozogniskowanie wiązki, ograniczonej średnicą kolimatora na końcu jonowodu.
b. – Eksperyment z 18 listopada 2005 roku (po remoncie). Widok wiązki protonów o energii nominalnej 60 MeV padającej na tarczy T7 z otworem o średnicy 20 mm. Przed tarczą T7 wiązka nie przechodziła przez inne kolimatory.



Rys. 15 Eksperyment z 18 listopada 2005 roku przeprowadzony na stanowisku terapeutycznym. Na dolnych zdjęciach widoczna fluorescencyjna tarcza pomiarowa T8, umieszczona na ławie optycznej, w różnych odległościach od końcówki jonowodu.

5. Energia wiązki protonów

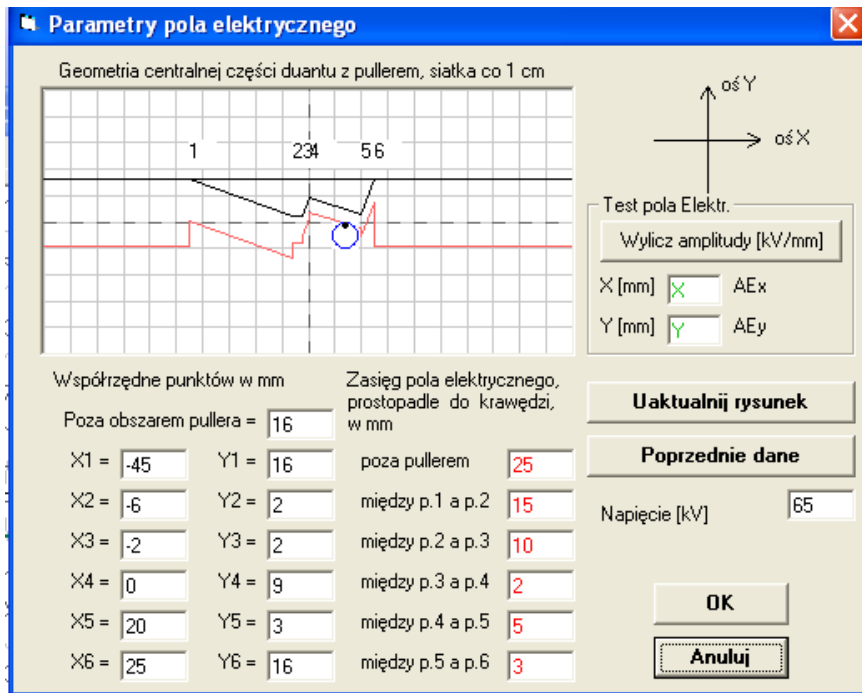
Energia protonów akcelerowana przy napięciu przyspieszającym o częstotliwości 26.25 MHz jest przyjmowana jako równa nominalnie 60 MeV. Rzeczywista energia protonów wyprowadzonej wiązki jest jednak inna. Przeprowadzono szereg eksperymentów mających na celu pomiar energii protonów na stanowisku terapeutycznym. Na rysunku 16 przedstawiono układ do pomiaru energii przy pomocy detektora scyntylacyjnego CsJ, współpracującego z fotodiodą oraz detektora półprzewodnikowego. W wyniku przeprowadzonych pomiarów określono energię protonów wiązki na $55,9 \pm 0,2$ MeV.



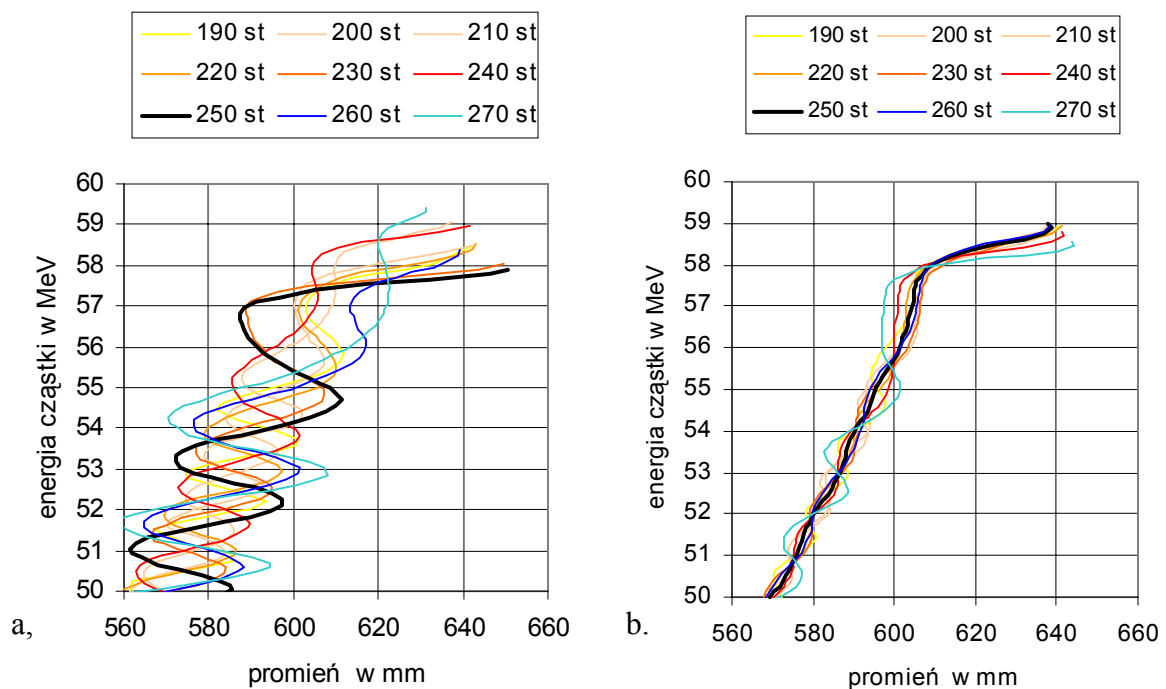
Rys. 16 Pomiar energii protonów na stanowisku terapeutycznym.

Konieczne są dalsze prace, które powinny doprowadzić do zwiększenia energii protonów na stanowisku terapii. Radykalne zmiany energii wymagają większych, kosztownych i czasochłonnych modernizacji cyklotronu. Wydaje się jednak możliwe pewne zwiększenie maksymalnej energii protonów przez stosunkowo proste, wymienione poniżej przedsięwzięcia:

- a. Przystosowanie kształtu pullera do większych energii (rys 17). Właściwie dobrany kształt pullera umożliwi eliminację, lub znaczne zmniejszenie, szkodliwych drgań w płaszczyźnie akceleracji i tym samym pozwoli na akcelerację do nieco większej energii. Przewidywana energia winna wzrosnąć maksymalnie o 1 MeV (Rys. 18).
- b. Zmniejszenie asymetrii pola magnetycznego na ostatnich, zewnętrznych orbitach (aktualnie silna asymetria jest konieczna do ekstrakcji protonów, wobec silnych drgań przyspieszonej wiązki). Przedsięwzięcie to powinno zwiększyć ilość cykli akceleracji i spowodować wzrost energii protonów opuszczających komorę cyklotronu.
- c. Prace polegające na polepszeniu jakości pola elektrycznego odpowiedzialnego za przyspieszanie protonów. Prace polegałyby na polepszeniu połączeń w komorze akceleracji dla prądów wysokiej częstotliwości i w konsekwencji zwiększenie rzeczywistego natężenia pola elektrycznego.



Rys. 17 Proponowany zmieniony kształt pullera do akceleracji protonów 60 MeV



Rys. 18 Wyliczona zależność energii protonów od promienia akceleracji (promień przechodzi przez wejście do deflektora 1). Obliczenia bez uwzględnienia wpływu prądów cewek harmoniczych.

a – przy aktualnym pullerze,

b – dla pullera przystosowanego do akceleracji protonów o energii nominalnej 60 MeV.

6. Uwagi końcowe

W raporcie przedstawiono działania, które doprowadziły do podniesienia energii protonów do około 56 MeV dostarczanych na stanowisko terapii protonowej. Przedstawiono przeprowadzone zmiany, ich efekty oraz wskazano dalsze działania mogące polepszyć jakość otrzymywanej wiązki jonów. Nie uwzględniono natomiast prac mających na celu:

- a. Ustalenie nastaw prądów w cewkach magnesu głównego, kształtujące pole magnetyczne w komorze akceleracji. Problem ten jest omawiany w przygotowywanej publikacji: R. Taraszkiewicz i inni, pod roboczym tytułem „Modelowanie punktów pracy uniwersalnego izochronicznego cyklotronu AIC144”
- b. Polepszenie niezawodności pracy poszczególnych podzespołów cyklotronu i układu traktu przyspieszanej wiązki. Dotyczy to zmiany źródła jonów, modernizacji układu próżniowego, zamierzeń mających przeciwdziałać awariom zasilaczy prądowych itp.
- c. Polepszenie modelowania procesu akceleracji w celu umożliwienia lub ułatwienia wykonywania optymalizacji nastaw. Dotyczy to wykonania pomiarów i narzędzi do obliczeń.

Przedstawione dokonania i zamierzenia na najbliższe miesiące są rezultatem pracy całego zespołu Działu Cyklotronowego. W pracy wykorzystano symulacje akceleracji wykonane przy pomocy programu AIC_tor3. Do symulacji stosowano wartości pól magnetycznych obliczonych przy pomocy programu SymMap2. We wszystkich obliczeniach nie uwzględniano zniekształceń pól magnetycznych na zewnętrznych promieniach, o których wspomniano w punkcie a rozdziału 3. Użyte programy były sporządzone w Dziale Cyklotronowym przez Krzysztofa Daniela. Wykorzystane w pracy zdjęcia są wykonane przez Janusza Łagisz i autorów.

7. Literatura

1. Bakewicz E. i in.; „AIC-144 cyclotron: prezent status”. Warszawa 2003. Nukleonika 48;2, 117-121
2. Bakewicz E. i in.; „Nowe źródło jonów cyklotronu AIC-144”. Raport IFJ PAN nr 1952/AP, Kraków 2004
3. Daniel K, i in.; „Symulacja pól magnetycznych w cyklotronie AIC-144”. Raport IFJ PAN nr 1971/AP, Kraków 2005.
4. Morozow N., Samsonow J., Szakun N.; „Dane projektowe elementów iniekcji” AIC-144. Dubna 2001, Publikacja wewnętrzna
5. Scharf W.; „Akceleratory cząstek naładowanych, Zastosowanie w nauce i technice”. Warszawa 1989, PWN.
6. Schwabe J.: „Izochroniczny cyklotron AIC-144.Podstawowe parametry i możliwości zastosowania”, Kraków 1990, IFJ.