

MASTER

Aanpassingen aan de ^{124}Xe -bestralingsopstelling voor routinematige productie van ^{123}I op de THE

van den Burg, R.M.W.J.

Award date:
1986

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Veiligheidsrapport bij de
124Xe-bestralingsopstelling

Addendum bij het afstudeerverslag

R.M.W.J. van den Burg
Technische Hogeschool Eindhoven
Afdeling der Technische Natuurkunde
Vakgroep Deeltjesfysica
Onderwerpgroep Cyclotrontoepassingen
Afstudeerhoogleraar Prof.dr.ir. H.L. Hagedoorn
Begeleider ir. A.J. Witsenboer

mei 1986

INHOUD

Voorwoord

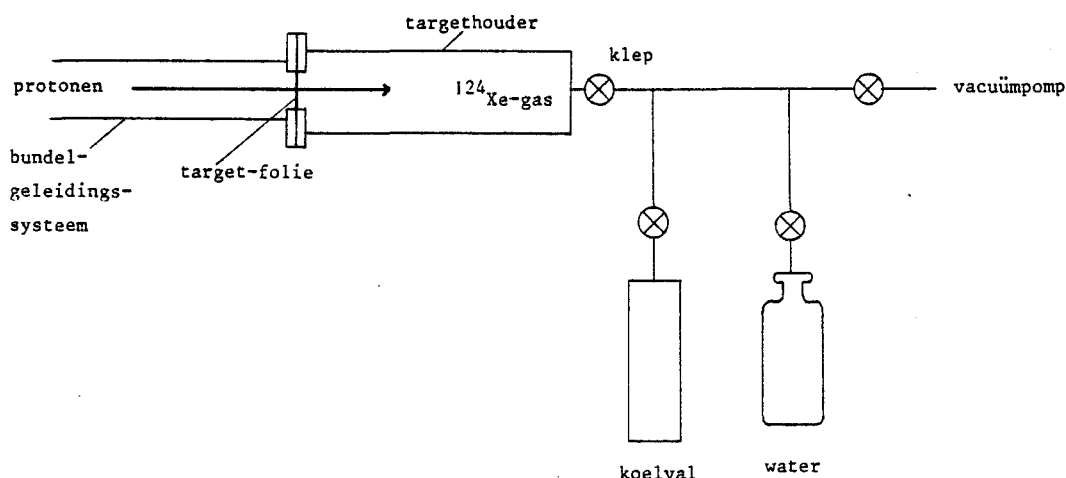
1	INLEIDING	1.1
2	BESCHRIJVING VAN DE OPSTELLING	2.1
2.1	Ontwerpoverwegingen	2.1
2.2	Beschrijving van de bestralingsopstelling	2.3
3	BESCHRIJVING VAN DE TE VERRICHTEN HANDELINGEN BIJ DE PRODUKTIE	3.1
4	INSTALLATIE VAN DE PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER IN DE PRODUKTIEOPSTELLING	4.1
4.1	Inleiding	4.1
4.2	Opbouw van het programma van de PLC	4.3
4.2.1	Indeling in compartimenten	4.4
4.2.2	Bedrijfstoestanden	4.9
4.2.3	De opbouw van het programma	4.10
4.2.4	Bediening tijdens de normale bedrijfstoestand	4.12
4.2.5	Beschrijving van het automatische spoelen	4.15
4.3	Beknopte handleiding bij de PLC	4.17
5	STRALINGSVEILIGHEIDSASPECTEN	5.1
5.1	Risico-analyse	5.1
5.1.1	Radionucliden-inventarisatie	5.1
5.1.2	Activering van de targethouder en de metaalfolies	5.7
5.1.3	Radioactief afval	5.10
5.2	Overzicht veiligheidsmaatregelen	5.11
5.2.1	Inrichting als C-laboratorium	5.11
5.2.2	Voorkomen van verspreiding van radioactiviteit	5.11
5.2.3	Beperking van inwendige besmetting	5.13
5.2.4	Beperking van uitwendige stralingsbelasting	5.14
5.2.5	ARAMOS	5.15
5.3	Storingsanalyse	5.17
	Literatuur	L.1
	Appendix A Listing van het PLC programma	A.1

Voorwoord

In dit rapport worden een aantal aspecten beschreven die betrekking hebben op de produktie van ^{123}I via bestraling van een xenon-gas-target. Ter verduidelijking van het rapport wordt hier alvast (zeer vereenvoudigd) het principe van deze bestralingsmethode beschreven.

Als ^{124}Xe bestraald wordt met protonen wordt ^{123}I gevormd. Dit ^{123}I slaat neer op de wand van de targethouder. De targethouder is een metalen cylinder, aan één zijde afgesloten door een dun folie, waarin het xenon zich tijdens de bestraling bevindt. Om het ^{123}I uit de targethouder te verwijderen wordt na de bestraling eerst het xenon-gas uit de targethouder naar een z.g.n. koelval getransporteerd (een koelval is een cylinder waarin xenon in vaste vorm neerslaat als men deze afkoelt met vloeibare stikstof). Vervolgens wordt water in de targethouder gepompt. Het ^{123}I lost op in dit water en kan daarna met het water uit de targethouder gepompt worden, waarna het verwerkt kan worden tot radiofarmacon (chemische verbinding waarin zich ^{123}I bevindt).

Een zeer vereenvoudigde schematische voorstelling van de bestralingsopstelling is weergegeven in onderstaande figuur. Er is getracht om in dit rapport de grootheden zoveel mogelijk in S.I.-eenheden uit te drukken. Enkele uitzonderingen hierop zijn de inhoud die in milliliter (ml) wordt gegeven, de energie die in elektronvolts (eV) wordt gegeven, en de tijd waarvoor soms de eenheden minuut (m), uur (h), dag (d) en jaar (y) gebruikt worden (met 1,30 h wordt 1 uur en 30 minuten bedoeld, met 1,30 h $1^{30}/_{100}$ uur). Verder wordt de activiteit behalve in Bq soms uitgedrukt in Ci. Door de aard van het vakgebied is het niet te vermijden enkele engelse vaktermen te gebruiken.



1 INLEIDING

De stralingsveiligheidsaspecten en het voorkomen van verlies van ^{124}Xe zijn in grote mate bepalend geweest bij het ontwerpen van de bestralingsopstelling, en spelen een belangrijke rol bij het uitvoeren van de routinematige produkties van ^{123}I .

In dit rapport is getracht een zo compleet mogelijk beeld te geven van de constructie en werking van de bestralingsopstelling, de logistiek van de bestralingen, de risico's (radio-logisch en conventioneel) die aanwezig zijn en de maatregelen die hiertegen getroffen zijn.

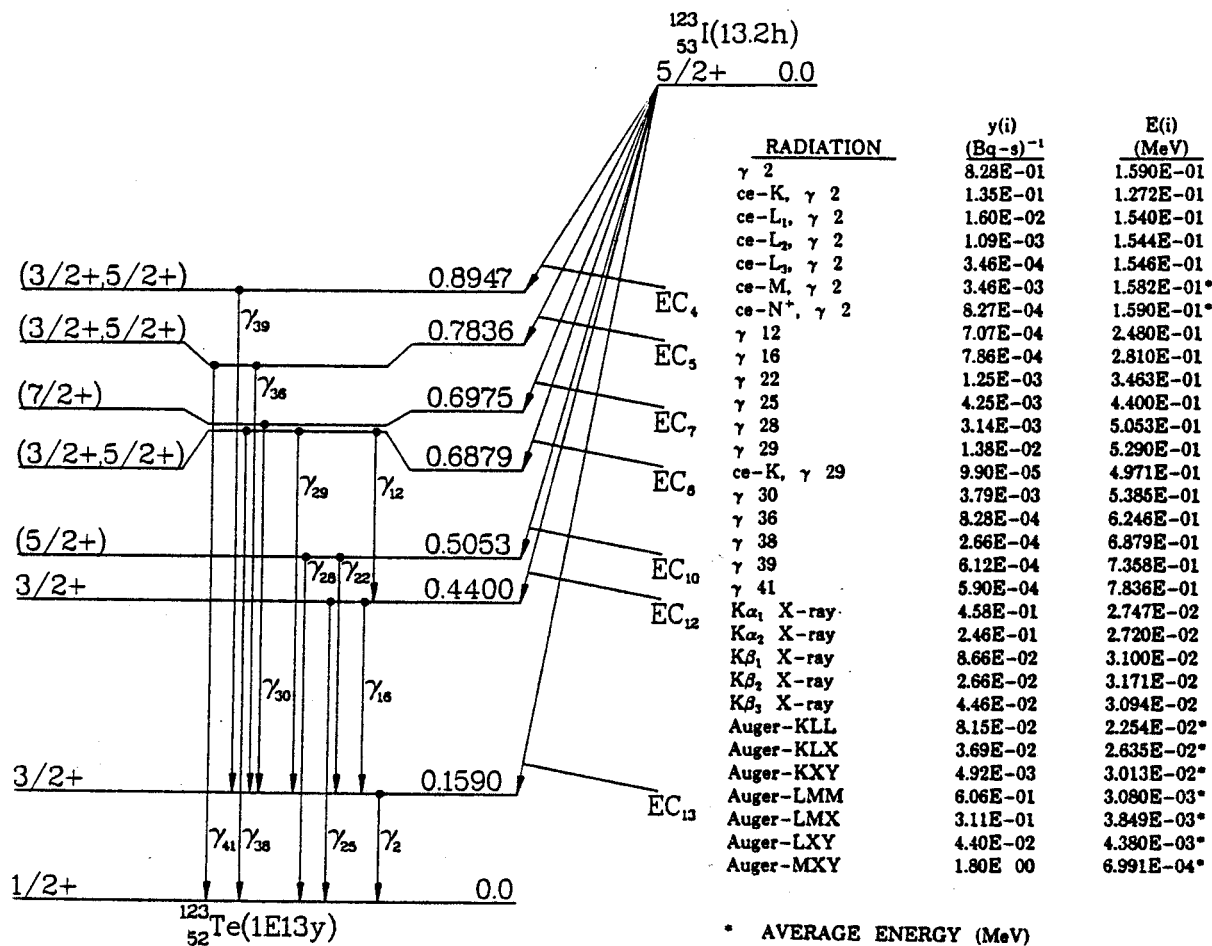


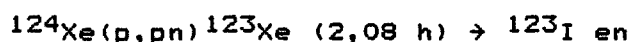
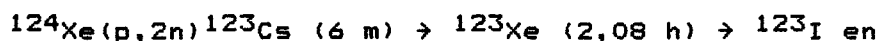
Fig. 1.1 Vereenvoudigd vervalschema van ^{123}I (ICR 83).

Het radionuclide ^{123}I wordt vanwege zijn gunstige fysische en chemische eigenschappen op vrij grote schaal gebruikt in de medische wereld. Als radiofarmacon wordt het voor verschillende orgaan- en functieonderzoeken gebruikt (BER 84, HAA 84, BUR 86).

Het vervalschema van ^{123}I is weergegeven in fig. 1.1.

Sinds december 1984 vindt de produktie van ^{123}I plaats via de bestraling van ^{124}Xe -gas met protonen.

Het radionuclide ^{123}I wordt bij deze methode geproduceerd volgens de volgende reacties:



De produktie van het ^{123}I vindt plaats in het Cyclotrongebouw, in bunker 3 (zie fig. 1.2 en 1.3).

Voordien werd ^{123}I geproduceerd door een verrijkt $^{124}\text{TeO}_2$ target met protonen te bestralen. Bij deze methode ontstaat echter als radionuclidische verontreiniging ^{124}I (BOS 77).

Bij de nieuwe produktiemethode wordt 110 ml, 99,8% verrijkt ^{124}Xe -gas bestraald met protonen met een energie van 26 MeV. Via de reactie $^{124}\text{Xe}(p,2n)^{123}\text{Cs}$ wordt ^{123}Cs aangemaakt. ^{123}Cs vervalst met een halveringstijd van 6 minuten naar ^{123}Xe dat op zijn beurt, met een halveringstijd van 2,08 uur, naar ^{123}I vervalst. ^{123}Xe wordt ook rechtstreeks via de reactie $^{124}\text{Xe}(p,pn)^{123}\text{Xe}$ aangemaakt, en vervalst weer naar ^{123}I .

In de targethouder, waarin zich het ^{124}Xe -gas bevindt, slaat het gevormde ^{123}Cs neer op de wand. Zowel het ^{123}Xe dat hieruit ontstaat als het ^{123}Xe dat rechtstreeks gevormd wordt, verdeelt zich in de targethouder, waarna het vervalst naar ^{123}I , dat op de wand neerslaat.

Enige tijd (\pm 30 minuten) na het einde van de bestraling (EOB) wordt het Xe-gas teruggewonnen in een koelval, '123-I-koelval-1', waar het ^{123}Xe vervalst naar ^{123}I .

Vervolgens wordt water dat als dragermateriaal een kleine hoeveelheid NaOH en CsI bevat in de targethouder gepompt om

het jodium op te lossen. Deze I⁻-oplossing wordt daarna teruggepompt in een aantal flesjes en in een transport-container naar een radiochemisch laboratorium in gebouw Athene vervoerd. Daarna wordt het ¹²³Xe en ¹²⁴Xe uit ¹²³I-koelval-1 overgeheveld naar een andere koelval (¹²³I-koelval-2) en ¹²³I-koelval-1 wordt met het gevormde ¹²³I naar het radiochemisch laboratorium gebracht, waar het ¹²³I met water uit de koelval gespoeld wordt.

In dit radiochemisch laboratorium vindt ook de opwerking tot de verschillende radiofarmaca plaats.

De ¹²³I-activiteit bij een 'gemiddelde produktie' (een bestraling van 7 uur met een gemiddelde bundelstroom van 30 μ A) is ca. 37 GBq (1 Ci), als de activiteit 6 uur na het einde van de bestraling (EOB) gemeten wordt. Er vindt twee maal per week (maandag- en woensdagavond) een bestraling plaats.

De indeling van dit rapport is als volgt:

In hoofdstuk 2 wordt de bestralingsopstelling beschreven.

In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op de handelingen die verricht worden bij de produktie van ¹²³I.

In hoofdstuk 4 wordt aandacht geschonken aan de beveiliging van het kleppensysteem m.b.v. een Programmable Logic Controller (PLC). Bovendien wordt beschreven hoe het geproduceerde ¹²³I geautomatiseerd uit de targethouder gespoeld kan worden.

In hoofdstuk 5 tenslotte worden de stralingsveiligheidsaspecten van de produktie van ¹²³I beschreven.

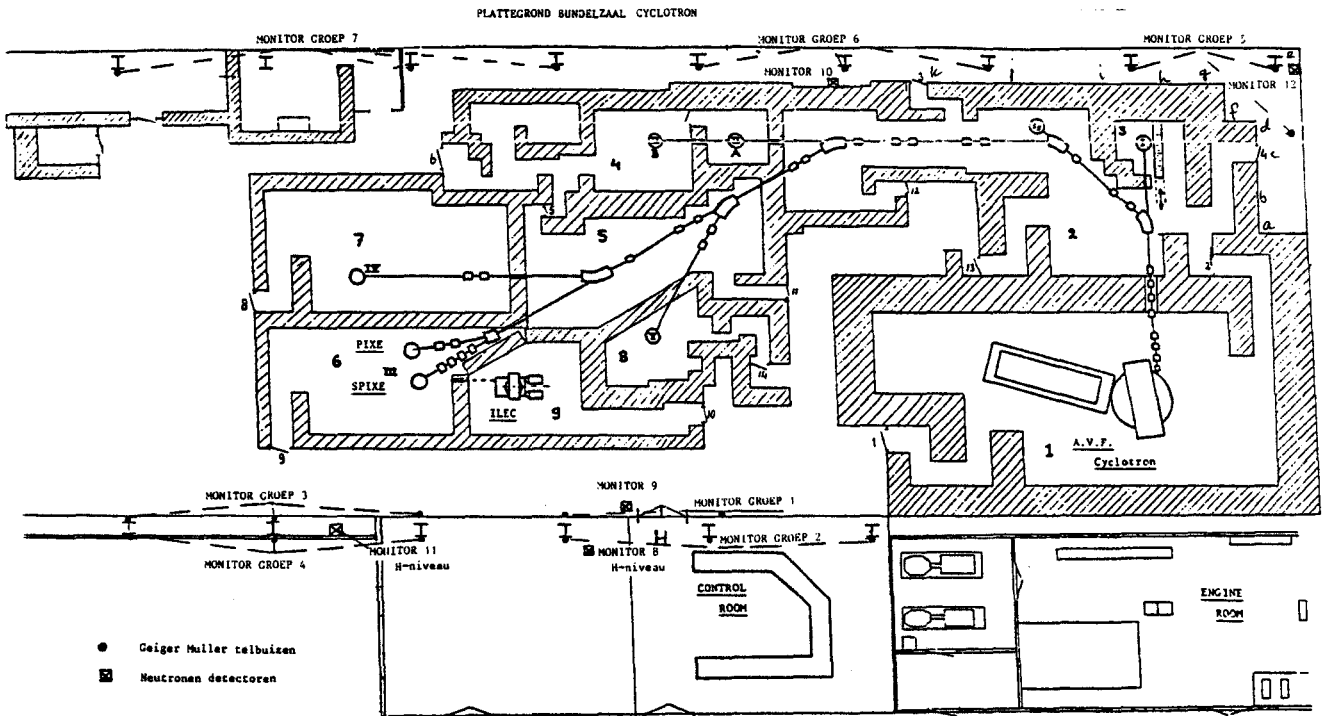


Fig. 1.2 Plattegrond van de bundelzaal, met een aantal meet- plaatsen (schaal 1:280)

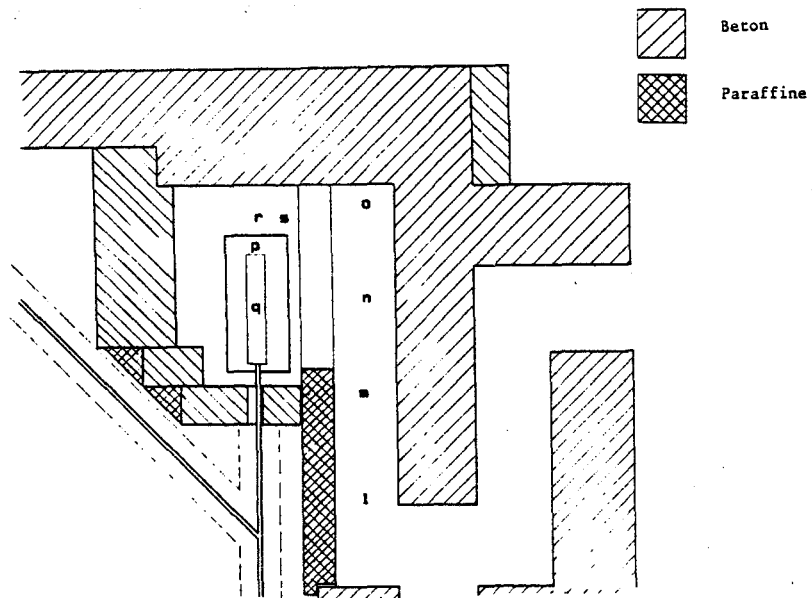


Fig. 1.3 Plattegrond van bunker 3, met een aantal meetplaat- sen (schaal 1:100)

2 DE BESTRALINGSOPSTELLING

In dit hoofdstuk wordt de ^{124}Xe -gastarget-bestralingsopstelling beschreven. Tevens is getracht aan te geven welke aspecten belangrijk zijn geweest bij de ontwikkeling van de complete opstelling

2.1 Ontwerpoverwegingen

Het gas in de targethouder wordt van het vacuüm van het bundelgeleidingssysteem (BGS) gescheiden door een metaalfolie (Molybdeen). Het folie dient dik genoeg te zijn om de druk van het gastarget te kunnen weerstaan, maar toch zo dun dat de energieafgifte van de protonen zo klein mogelijk is. Dit laatste om de volgende twee redenen: ten eerste omdat het folie door de energieafgifte van de protonen opwarmt, waardoor de sterkte van het folie sterk kan verminderen (KLE 84) en ten tweede omdat energieverlies in het folie verlies aan opbrengst van ^{123}I betekent (BER 84).

Uit experimenten (SLA 86) is gebleken dat Molybdeen-folies met een diameter van 13 mm en een dikte van 25 μm betrouwbaar zijn bij een bundelstroom van 30 μA en een druk van 8 bar. De druk is o.a. afhankelijk van de grootte van de bundelstroom. Bij de routinematige bestralingen is gekozen voor een targetfolie met een diameter van 12 mm en een dikte van 25 μm . De maximale bundelstroom die gebruikt wordt is 30 μA (dit leidt tot een gedissipeerd vermogen van 9,2 W in het folie). Bij een maximale bundelstroom van 30 μA is de druk in de targethouder niet te hoog (de vuldruk (bij $T=290\text{K}$ en $I=0 \mu\text{A}$) is 2,5 bar, terwijl de druk bij 30 μA ca. 4,8 bar is).

Voor de targethouder is een bufferruimte aangebracht die door een zelfde folie van het BGS gescheiden is. De bufferruimte is geëvacueerd en heeft twee functies. Ten eerste, uit stralingshygiënisch oogpunt: als het folie van de targethouder mocht breken of lekken, wordt het xenongas in de

bufferruimte opgevangen, waardoor het bundelgeleidingssysteem van het cyclotron en de lucht in de bundelzaal niet besmet worden. Ten tweede kan het xenon na een foliebreuk uit de bufferruimte worden teruggewonnen en gaat dus niet verloren via de op het BGS aangesloten vacuümpomp. De flens waarop het folie van de bufferruimte gemonteerd is functioneert tevens als diafragma van de protonenbundel.

Om een voldoende hoge opbrengst (activiteit per eenheid van opgebrachte lading) van ^{123}I te verkrijgen is een hoge protonenstroom ($> 10 \mu\text{A}$) vereist.

Dit maakt koeling van de targethouder noodzakelijk. Ook de flens aan de voorkant van de bufferruimte, het diafragma, wordt gekoeld omdat er enkele μA 's op vallen. De energieafgifte is 26 W per μA .

Het xenon wordt opgeslagen in z.g.n. koelvallen. Dit zijn cylinders die afgekoeld kunnen worden m.b.v. vloeibare stikstof. Bij de temperatuur van vloeibare stikstof (77 K) slaat het xenon in vaste vorm neer op de wand (het smeltpunt van xenon is 161 K). De dampspanning bij 77 K is 2,6 Pa. Dit is dus een efficiënte manier om xenon te verplaatsen.

Het xenon wordt opgeslagen bij een druk die lager is dan de atmosferische druk, zodat bij een eventuele lek lucht de opslagcilinder in stroomt i.p.v. xenon naar buiten. Omdat uit experimenten gebleken is dat lucht en xenon redelijk eenvoudig te scheiden zijn (door het grote verschil in kookpunt tussen Xe enerzijds en N_2 , O_2 en Ar anderzijds), zal bij een inlek het dure xenon (na zuivering) behouden blijven. Om al het xenon dat zich na het opwarmen van de opslagkoelval in het kleppensysteem bevindt in de targethouder te krijgen is achterop de targethouder een kleine koelval ('koelvinger') gemonteerd. Het xenon slaat neer in de koelvinger als deze afgekoeld wordt met vloeibare stikstof. Als de klep tussen de targethouder en het kleppensysteem gesloten wordt en de koelvinger opwarmt bevindt al het xenon zich in de targethouder. Op deze manier wordt het xenon efficiënt benut.

Na afloop van een bestraling moet het xenon in de target-

houder gescheiden worden van het ^{123}I . Dit kan op twee manieren bereikt worden: de eerste mogelijkheid is het xenon (^{123}Xe) naar ^{123}I te laten vervallen in de targethouder en het enkele (4-9) uren na EOB terug te winnen in een koelval, waarna de targethouder met een vloeistof uitgespoeld kan worden. De tweede mogelijkheid is het xenon vlak na EOB terug te winnen in een loskoppelbaar vat. Het xenon laat men hierin vervallen naar ^{123}I . Enkele uren later wordt het xenon naar een koelval overgeheveld, waarna het vat losgekoppeld en het ^{123}I uitgespoeld wordt.

Het nadeel van beide methoden is dat vrij lang gewacht moet worden alvorens het ^{123}I beschikbaar is voor opwerking tot radiofarmacon. Daarom is gekozen voor een combinatie van beide methoden, omdat dan vlak na de bestraling al een gedeelte van het ^{123}I gebruikt kan worden.

De targethouder moet met water afspoelbaar zijn en is daarom vervaardigd van een gemakkelijk afspoelbaar (edel) metaal (nikkel). Om ook het ^{123}I aan de bovenzijde van de targethouder te kunnen uitspoelen kan de targethouder draaien om zijn lengteas.

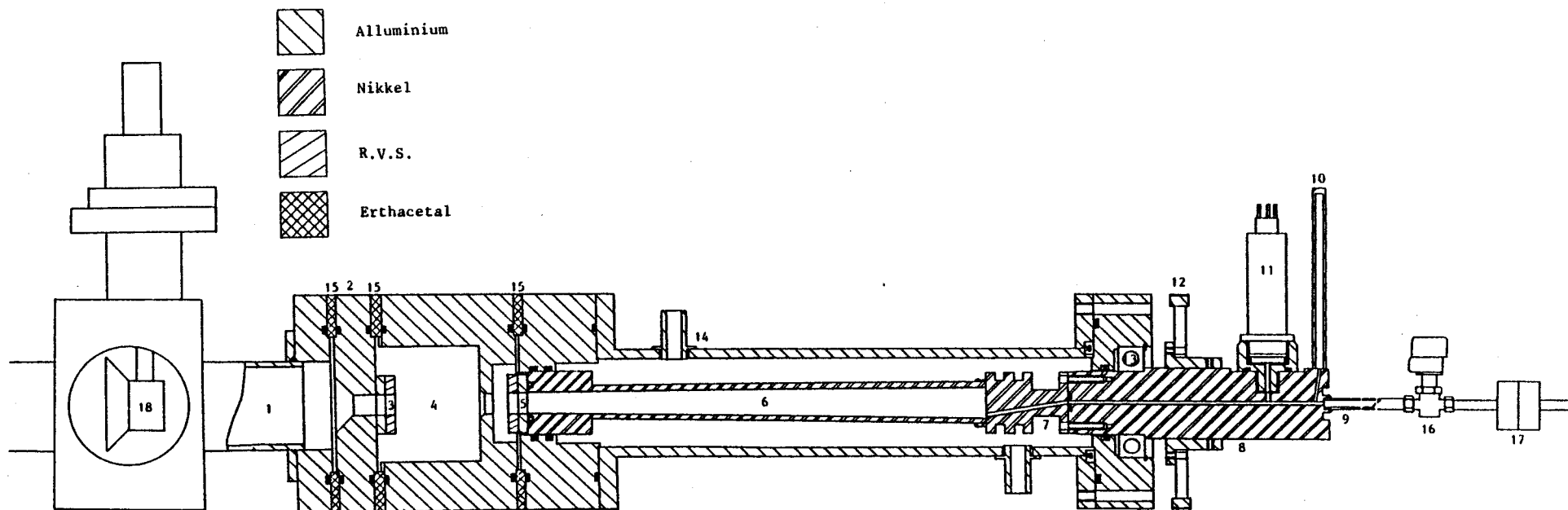
2.2 Beschrijving van de bestralingsopstelling

In fig 2.1 en 2.2 is de opstelling die gebruikt wordt voor de ^{123}I -produktie geschetst.

Het xenon bevindt zich tijdens de bestraling in de (nikkelen) targethouder onder een druk van maximaal 5 bar.

De targethouder en de bufferruimte worden afgesloten door Molybdeen-folies met een dikte van 25 μm .

De versnelde protonen komen via het bundelgeleidingssysteem (1) en een diafragma (2) door een folie (3) de bufferruimte (4) binnen en gaan vervolgens door het tweede folie (5) de targethouder (6) in. Hier worden de protonen door het xenon-gas gedeeltelijk afgeremd. De protonen worden uiteindelijk



- | | | | | | |
|---|-------------------------|----|-----------------|----|--------------------------|
| 1 | Bundelgeleidingssysteem | 7 | Stopblok | 13 | Kogellager |
| 2 | Flens met diafragma | 8 | Nikkelen staaf | 14 | Koelmantel |
| 3 | Buffer-folie | 9 | Nikkelen buisje | 15 | Erthacetal isolatieflens |
| 4 | Bufferruimte | 10 | Koelvinger | 16 | Persluchtklep P5 |
| 5 | Target-folie | 11 | Drukopnemer | 17 | Draaibare koppeling |
| 6 | Targethouder | 12 | Tandwiel | 18 | Bundelstop |

Fig. 2.1 De bestralingsopstelling

Achter het stopblok bevindt zich een nikkelen staaf (8) waarop een tandwiel (12) en een drukopnemer (11) zijn bevestigd. De drukopnemer heeft nagenoeg geen inwendig volume en functioneert op basis van een inductieve meetbrug (HOT 83).

De druk in de targethouder kan in de bedieningsruimte worden afgelezen. Op de staaf is ook nog een kleine koelval ('koelvinger') (10) geplaatst, waarmee het xenon van de opslagruimte naar de targethouder verplaatst kan worden. Achterop deze nikkelen staaf is een nikkelen buisje (9) gelast, waarop een kraan (16) bevestigd is om de targetbuis af te sluiten tijdens de bestraling.

Tijdens de bestraling kan de protonenstroom op het diafragma, de bufferruimte en op de targethouder afzonderlijk gemeten worden. Deze plaatsen zijn onderling elektrisch geïsoleerd d.m.v. kunststof (erthacetal) flenzen (15).

De targethouder wordt gekoeld via een koelmantel (14), waardoor tijdens de bestraling gedestilleerd water door een centrifugaalpomp in een gesloten circuit wordt rondgepompt. Dit water wordt in een buffervat via een warmtewisselaar met leidingwater gekoeld. Ook het diafragma wordt gekoeld.

Er is in het koelwatercircuit een z.g.n. waterslot aangebracht waarmee gecontroleerd wordt of de water-flow boven een bepaalde waarde blijft. Wordt de flow te laag, dan valt automatisch de bundelstop dicht waardoor er geen stroom meer op het target valt.

Om het ^{123}I van de wand te kunnen spoelen, ligt de targethouder in 2 kogellagers (13) en kan om zijn lengteas roteren m.b.v. een stappenmotor. De rotatiesnelheid en de juiste stand van de targethouder om water uit de targethouder te pompen worden elektronisch geregeld.

De targethouder is m.b.v. een draaibare koppeling (17) verbonden met een messing leidingsysteem. Ook de bufferruimte is verbonden met dit leidingsysteem.

In het leidingsysteem zijn een aantal perslucht bediende kleppen (P1-P12), magneetventielen (M1-M5), vacuümkleppen

(VK1-VK3) en handkleppen (H1-H4, H11 en HVK1) opgenomen. M.b.v. deze kleppen kan xenon, lucht en spoelvlloeistof door het gehele systeem getransporteerd worden. Zo kunnen de targethouder en de bufferruimte verbonden worden met vacuumpompen (POMP 1, POMP 2), koelvallen (C1, C2, C3 en C4) die in de vloeibare stikstof geplaatst kunnen worden en een slangenpomp waarmee spoelvlloeistof in en uit de targethouder gepompt kan worden. Bovendien kan de targethouder belucht worden. Er is een aparte vacuumpomp (POMP 3) geïnstalleerd om het BGS vóór-vacuüm te pompen.

Op verschillende plaatsen in het leidingensysteem zijn druk- en vacuümpnemers (DRUK B, DRUK F, DRUK TARGET, VAC 1, VAC 2, VAC B en VAC F) aangebracht die op het bedieningspaneel afgelezen kunnen worden.

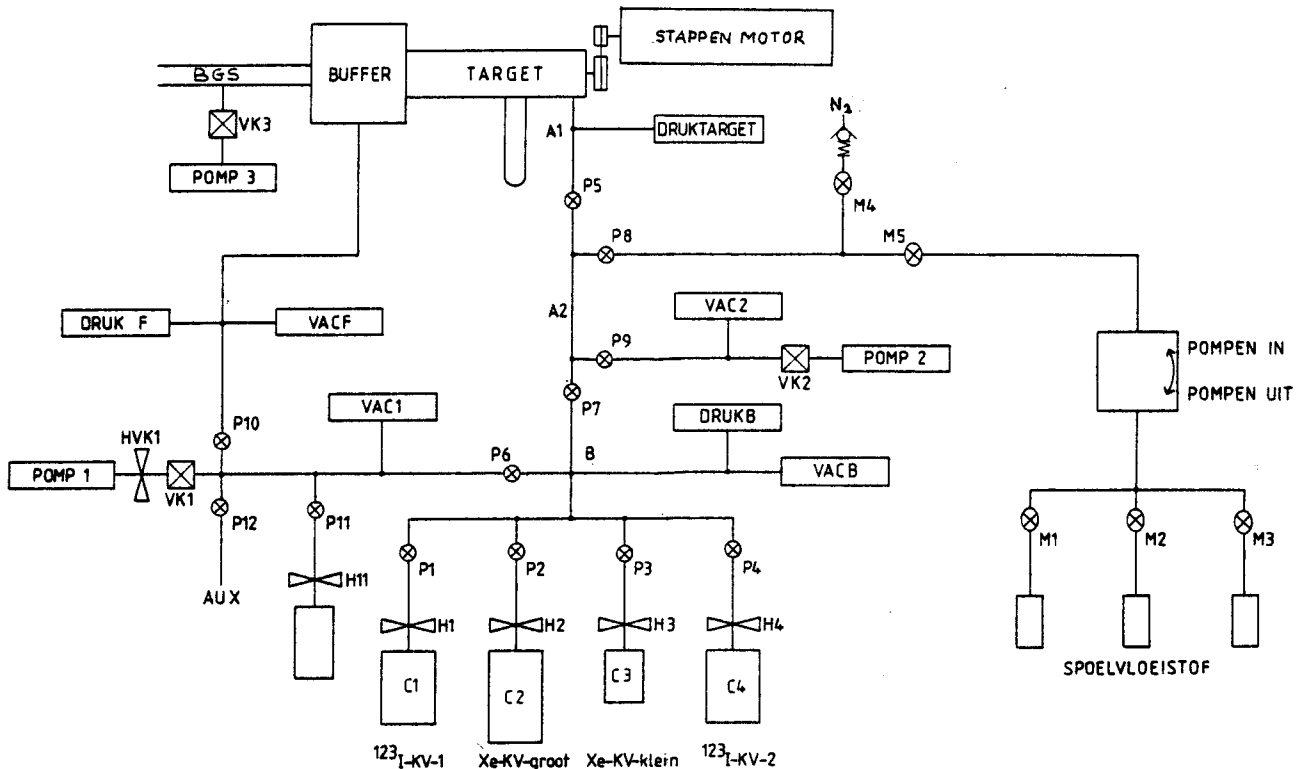


Fig. 2.2 Overzicht van de kleppensysteem

3 BESCHRIJVING VAN DE TE VERRICHTEN HANDELINGEN BIJ DE PRODUKTIE VAN ^{123}I

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke handelingen verricht worden bij de routine-productie van ^{123}I . Een schema van het kleppensysteem is gegeven in fig. 2.2 op pagina 2.6.

Uitgangssituatie

- dewarvat met vloeibare stikstof (LN_2) is aanwezig.
- het bundelgeleidingssysteem (BGS) is vacuüm.
- de bufferruimte is vacuüm.
- alle kleppen (P's, M's en VK's) zijn gesloten.
- de drukmeters 'DRUKTARGET' en 'DRUKB' zijn ingesteld op 0.00 bar.

Nadat aan bovenstaande voorwaarden is voldaan wordt de waterkoeling van de targetbuis aangezet en de flow en temperatuur van het water genoteerd.

Het vacuüm in de targetbuis en de rest van het leidingsysteem (vacB) wordt gecontroleerd, en indien de druk nog te hoog is wordt verder vacuüm gepompt, of zonodig gecontroleerd op lekkages.

Gas inlaten

Uit de (warme) koelval wordt Xe-gas naar de (koude) koelvinger overgebracht, P5 wordt gesloten en de koelvinger warmt op. Dan wordt de druk in de targetbuis ongeveer 2,45 bar. Het restant van het Xe wordt teruggewonnen in een koelval (C2). De flesjes met spoelvloeistof worden in een rekje geplaatst. De schuifdeur, bestaande uit beton + paraffine wordt gesloten en bunker 3 wordt verlaten.

Bestraling 1

BOB (Begin of Bombardment), de druk in de targetbuis wordt genoteerd en de bestraling wordt gestart.

Van tijd tot tijd (\pm eens per uur) noteert men de druk in de targetbuis, de targetstroom, de stroom op de spleten, de stroom op het diafragma, de stroom op de bufferruimte, de

temperatuur en de hoeveelheid opgebrachte lading, dit om te controleren of de protonenbundel nog goed op het target gericht is, en om te controleren of er geen xenon-gas weglekt. Het aflezen van de druk, de temperatuur en de diverse stromen gebeurt in de bedieningsruimte. Na afloop van de eerste bestraling wordt het tijdstip EOB (End of Bombardment) genoteerd.

Bestraling 2

Bij de tweede bestraling vindt dezelfde procedure plaats als bij de eerste.

Tussen de twee bestralingen vindt in bunker 4A de produktie van een ander radionuclide plaats.

Terugwinnen in 123-I-koelval-1

Na de bestraling moet het Xe-gas terug gewonnen worden in 123-I-koelval-1.

Eerst wordt in bunker 3 de druk in het leidingsysteem gecontroleerd. Vervolgens wordt het Xe-gas ($^{124}\text{Xe} + ^{123}\text{Xe}$) terug gewonnen in 123-I-koelval-1. Het restant van het Xe-gas dat niet in 123-I-koelval-1 wordt teruggewonnen wordt in Xe-koelval-klein teruggewonnen.

Uitspoelen (zie hoofdstuk 4 voor automatisch spoelen)

Er wordt stikstof (via M4, P8 en P5) in de targetbuis toegelaten (tot atmosferische druk) en de waterkoeling wordt uitgezet.

Dan wordt spoelvloeistof mbv een slangenpomp in de targetbuis gepompt (tot de druk 0,7 bar is), P5 wordt gesloten en de targetbuis wordt vervolgens enkele uren d.m.v. een stappenmotor heen en weer gedraaid.

De volgende morgen (ca. 6 uur na EOB) wordt de spoelvloeistof uitgepompt en opgevangen in het flesje waarin de spoelvloeistof zich aanvankelijk bevond. Hierna wordt deze inpomp-draai-uitpomp-cyclus nog 2 of 3 maal herhaald met andere flesjes spoelvloeistof, maar nu wordt telkens slechts 10 minuten gedraaid. Telkens wordt de code voor de spoelvloeistof*, de druk na het inpompen, het tijdstip van starten

en stoppen met draaien en de activiteit in het opvangflesje genoteerd.

Het uitspoelrendement van het jodium is 80-90%, zodat zich na het uitspoelen nog ca. 50 mCi ^{123}I in de targethouder bevindt. De flesjes worden, nadat via een grove meting van de activiteit van de flesjes is vastgesteld dat het ^{123}I goed is uitgespoeld, in een transportcontainer naar een radiologisch laboratorium in gebouw Athene gebracht.

Na het uitspoelen wordt de targetbuis + leidingensysteem vacuüm gepompt.

* Als spoelvloeistof wordt 20 ml 0,0002M NaOH met 1 $\mu\text{g/ml}$ CsI, of een 0,002M NaOH-oplossing gebruikt. Het toevoegen van deze kleine hoeveelheden CsI en NaOH resulteert in een hoger uitspoelrendement.

Terugwinnen in 123-I-koelval-2

Ongeveer 9 uur na EOB wordt het Xe-gas uit 123-I-koelval-1 teruggewonnen naar 123-I-koelval-2. Daarna wordt de handkraan op 123-I-koelval-1 dichtgedraaid en wordt deze koelval afgekoppeld en in een transportcontainer naar gebouw Athene vervoerd. Daar wordt m.b.v. een ionisatiekamer de activiteit van het ^{123}I bepaald.

Daarna wordt het systeem verder vacuüm gepompt.

Voor de duidelijkheid is op de volgende pagina een mogelijk tijdschema gegeven.

17.00 BOB1
BOB1+ 5.00 EOB1
BOB1+ 7.00 BOB2
BOB1+ 9.00 EOB2
BOB1+ 9.30 ^{123}Xe en ^{124}Xe \rightarrow 123-I-koelval-1
BOB1+10.00 Spoelvloeistof in targetbuis pompen en targetbuis draaien.
BOB1+16.00 Spoelvloeistof met ^{123}I uitspoelen.
Hierna het proces van spoelvloeistof inpompen, draaien en uitpompen nog 2 of 3 maal herhalen gedurende ca. 10 minuten.
BOB1+16.30 De targethouder wordt vacuüm gepompt.
BOB1+16.40 Flesjes met spoelvloeistof met ^{123}I gaan in een SBD-container naar gebouw Athene. De totale activiteit op dat moment is ca. 350 mCi.
BOB1+18.15 ^{123}Xe en ^{124}Xe uit 123-I-koelval-1 \rightarrow 123-I-koelval-2.
BOB1+19.00 123-I-koelval-1 met ca. 120 mCi ^{123}I naar gebouw Athene.

Nadat bovengenoemde handelingen hebben plaatsgevonden wordt de bestralingsopstelling gereed gemaakt voor de volgende bestraling. Hierbij wordt het xenon-gas gezuiverd (van water en lucht) en vervolgens overgebracht in Xe-KV-groot. Hierna wordt de hele opstelling, inclusief C1, C2, C3, C4 en de bufferruimte vacuüm gepompt ($p < 5 \cdot 10^{-2}$ mbar). Tenslotte worden er een aantal controles op lekkages en op het functioneren van diverse componenten uitgevoerd.

4 INSTALLATIE VAN DE PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER IN DE PRODUKTIEOPSTELLING

Enerzijds vanwege de hoge kostprijs van het verrijkte ^{124}Xe , anderzijds om de kans op een radioactieve besmetting t.g.v. ^{123}Xe te verkleinen, is besloten de bediening van het kleppensysteem gecontroleerd uit te voeren om foutieve bediening (waardoor xenon-gas uit het kleppensysteem zou kunnen ontsnappen) te voorkomen. Verder bestond de behoefte om het uitspelen van het ^{123}I uit de targethouder automatisch uit te voeren. Om dit te kunnen realiseren is een Programmable Logic Controller (PLC) geïnstalleerd.

4.1 Inleiding

Een PLC is een programmeerbare besturing, een eenvoudige computer waarmee een aantal apparaten, die aangesloten zijn op de PLC, gecontroleerd bediend kunnen worden. De PLC bevat een aantal ingangen, uitgangen, timers, counters en hulpfuncties. Logisch gezien is een ingang een status-bit dat de waarde 0 of 1 aanneemt. Als er een hoge spanning ($> 16\text{V}$) op een ingang staat is de status van de ingang 1, bij een lage spanning ($< 16\text{V}$) is de status 0. De spanning op de ingang wordt bv. bepaald door de stand van een schakelaar op een bedieningspaneel, of een schakelcontact in een druk-meter. Via de uitgangen worden de aangesloten apparaten (kleppen, pompen, e.d.) bediend.

Timers worden bv. gebruikt om een uitgang een bepaalde tijd te activeren.

Counters worden gebruikt om te registreren hoe vaak een ingang geactiveerd is (hoe vaak een schakelaar uit- en aangezet is).

Hulpfuncties worden gebruikt om te registreren dat een bepaalde situatie (bv. het gelijktijdig geactiveerd zijn van een aantal ingangen en een aantal uitgangen) zich heeft voorgedaan.

De status van ingangen, uitgangen, timers, counters en hulpfuncties kan slechts 2 logische waarden aannemen: 0 of 1.

Bij in- en uitgangen bepaalt de status het al dan niet geactiveerd zijn van de betreffende in/uitgang. Bij timers bepaalt de status het al dan niet verstreken zijn van een bepaald tijdsinterval. Bij counters bepaalt de status of een ingang al dan niet een aantal malen geactiveerd is, bij hulpfuncties of een bepaalde situatie zich al dan niet heeft voorgedaan.

De PLC bevat een stuk RAM-geheugen waarin het programma staat. Het programma bepaalt van elke uitgang of hij wel of niet bekrachtigd mag worden (blijven), afhankelijk van de status van een aantal ingangen, uitgangen, hulpfuncties, timers en counters.

De filosofie achter het ontwerp van het kleppensysteem is dat er minstens 2 kleppen tegelijkertijd verkeerd zouden moeten staan alvorens xenon kan ontsnappen uit het kleppensysteem. Een verkeerde stand van een klep kan optreden door een verkeerde bediening (menselijke fout) of door een mechanisch storing.

De installatie van de PLC garandeert dat een verkeerde handeling op het bedieningspaneel, waardoor een 'gevaarlijke' situatie zou ontstaan, niet leidt tot een verkeerde bekrachtiging van een klep of pomp (tenminste als het programma 'waterdicht' is).

Het is moeilijk een schatting te maken van de kans dat een mechanische storing optreedt (een mogelijke oorzaak van een mechanische storing is dat er vuil in de klep terecht komt, waardoor een goede afdichting niet meer mogelijk is), maar de kans dat dat bij twee kleppen tegelijkertijd een mechanische storing optreedt is enkele orden van grootte kleiner dan de kans op één mechanische storing.

De gecontroleerde bediening is er op gericht te voorkomen dat er:

- 1) Xe-gas weggepompt wordt met een vacuümpomp
- 2) lucht of water met het Xe-gas vermengd wordt
- 3) Xe-gas verloren gaat bij het afkoppelen van een koelval

Enkele randvoorwaarden waaraan de 'beveiliging' van het kleppensysteem moet voldoen zijn:

- Alle kleppen en de slangenpomp moeten met de hand (dus niet automatisch) bediend worden (uitgezonderd bij het automatisch spoelen).
- De bediening moet plaats vinden in de buurt van de bestralingsbunker op een plaats waar het stralingsnivo voldoende laag is.
- De bediening van het kleppensysteem moet gebruikersvriendelijk zijn.
- De 'beveiliging' moet uitschakelbaar zijn om in noodgevallen (bv. in het (uiterst onwaarschijnlijke) geval van een lekkage van het kleppensysteem) zoveel mogelijk vrijheid van handelen te hebben (bovendien is het uitschakelen van de beveiliging soms erg handig bij het uittesten van het kleppensysteem).

4.2 Opbouw van het programma van de PLC

De bediening van het kleppensysteem gebeurt via een bedieningspaneel. De schakelaars op het bedieningspaneel, alsmede de schakelcontacten van de druk-meters zijn verbonden met de ingangen van de PLC. De uitgangen van de PLC zijn verbonden met de kleppen P1-P9, M1-M4, de slangenpomp en de stappenmotor, die de targethouder ronddraait (zie fig. 4.1). De overige kleppen die op het bedieningspaneel bediend kunnen worden (P10-P12, M5, H1-H4, H11, HVK1 en VK1-VK3) worden niet door de PLC gecontroleerd.

De bediening van de kleppen die op de PLC aangesloten zijn geschiedt aan de hand van een programma dat uitgevoerd wordt. Het programma bestaat uit een aantal (ca. 800) stappen die

een voor een uitgevoerd worden. Een stap bestaat bv. uit het testen of een ingang een bepaalde waarde heeft, het bekrachtigen van een uitgang, of het springen naar een ander deel van het programma (alleen voorwaartse sprongen zijn mogelijk). Na het uitvoeren van de laatste stap van het programma wordt naar het begin van het programma gesprongen. Het van het begin tot het eind uitvoeren van het programma wordt het doorlopen van één cyclus genoemd en duurt ca. 40 ms.

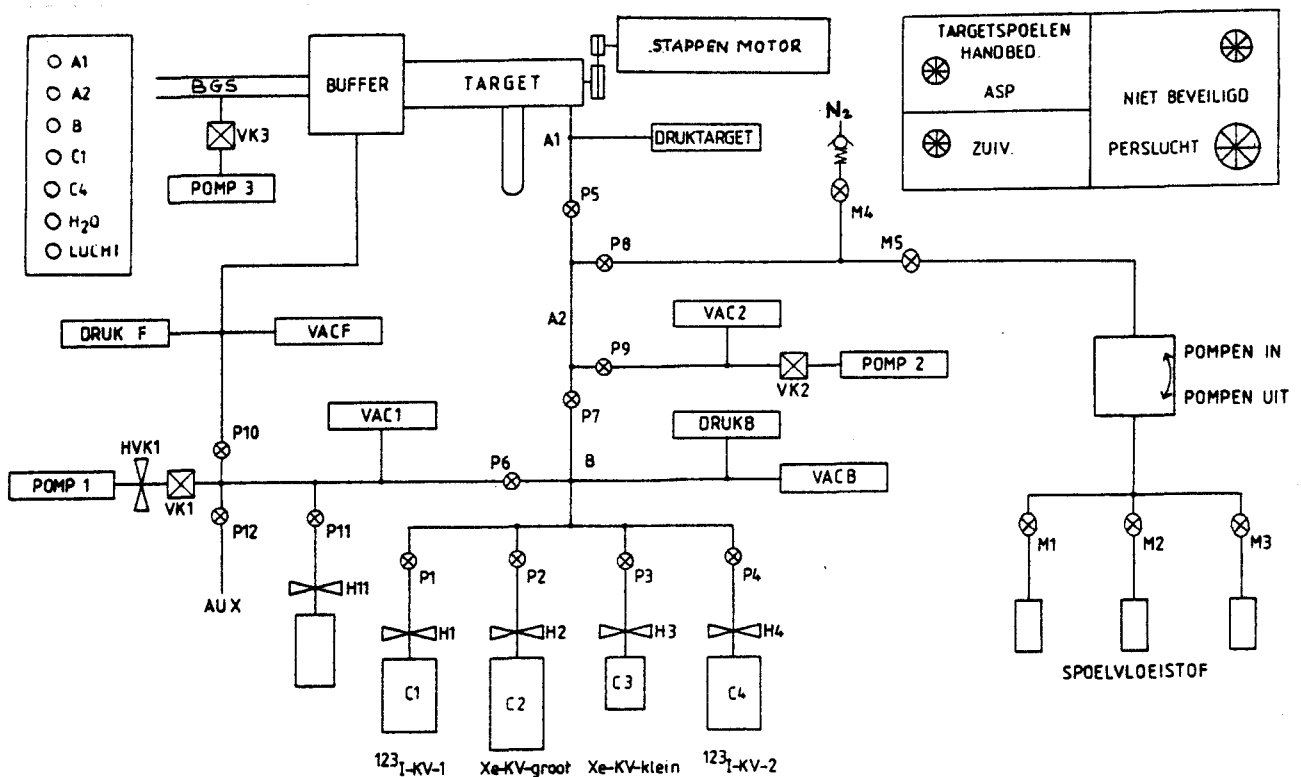


Fig 4.1 Overzicht van het kleppensysteem

4.2.1 Indeling in compartimenten

Om het programma in de PLC overzichtelijk te houden bleek het zinvol een aantal door persluchtkleppen van elkaar gescheiden compartimenten in het kleppensysteem te definiëren. Compartiment A1 wordt gevormd door de targethouder, de kleine

koelvinger en het stukje leiding tussen klep P5 en de targethouder; compartiment A2 is het gedeelte van van het kleppensysteem dat begrensd wordt door de kleppen P5, P7, P8 en P9; compartiment B wordt begrensd door de kleppen P1, P2, P3, P4, P6 en P7; de compartimenten C1, C2, C3 en C4 worden gevormd door de 4 koelvallen die voor de opslag van het xenon-gas gebruikt worden (zie fig. 4.1).

Voor de verschillende compartimenten geldt:

In A1 en A2 mag zowel water en lucht als Xe toegelaten worden.

In B, C1 en C4 mag alleen Xe (na af- en aankoppeling van koelval 1 of koelval 4 ook lucht) toegelaten worden.

In C2 en C3 mag alleen Xe toegelaten worden.

Van alle compartimenten wordt door de PLC bijgehouden of er zich Xe, water of lucht in bevindt (door te controleren welke kleppen geopend worden en de vacuüm-druk te meten in compartiment B en bij vacuümpomp 2 is dit mogelijk; aangenomen wordt dat na het openen van een klep de vacuüm-meter binnen 1 seconde de juiste waarde van de druk aangeeft). Hiervoor worden een aantal hulpfuncties gebruikt, genaamd: Alleeg, A2leeg, Bleeg, C1leeg, C4leeg, waterinA1, waterinA2, en luchtinB. De hulpfuncties kunnen de logische waarde 1 of 0 aannemen.

Een waarde 1 voor een hulpfunctie betekent voor:

Alleeg	:	er bevindt zich geen Xe-gas in compartiment A1.
A2leeg	:	" geen Xe-gas " A2.
Bleeg	:	" geen Xe-gas " B.
C1leeg	:	" geen Xe-gas " C1.
C4leeg	:	" geen Xe-gas " C4.
WaterinA1	:	" water " A1.
WaterinA2	:	" water " A2.
LuchtinB	:	" geen Xe-gas " B,

maar de druk in B is hoog, zodat B lucht bevat.

Met 'de druk is hoog' wordt bedoeld dat de vacuümmeter (vac2 of vacB) een druk aangeeft die groter is dan $2 \cdot 10^{-2}$ mbar.

Een waarde 0 voor een hulpfunctie betekent voor:

A1leeg	:	er bevindt zich Xe-gas	in compartiment A1.
A2leeg	:	" Xe-gas	" A2.
Bleeg	:	" Xe-gas	" B.
C1leeg	:	" Xe-gas	" C1.
C4leeg	:	" Xe-gas	" C4.
WaterinA1	:	" geen water	" A1.
WaterinA2	:	" geen water	" A2.
LuchtinB	:	" geen lucht	" B.

Het is niet noodzakelijk om voor elk compartiment een -leeg, waterin-, en luchtin- functie te reserveren omdat:

- er wordt aangenomen dat zich altijd Xe in C2 en C3 kan bevinden (C2 en C3 zijn de niet-afkoppelbare opslag-koelval-
vallen).
- m.b.v. de PLC wordt voorkomen dat er water van compartiment A2 naar compartiment B of lucht vanuit compartiment B naar compartiment C2 of C3 stroomt.
- als koelval 1 of 4 (123-I-KV-1 resp. 123-I-KV-2) af- of
aangekoppeld wordt mag deze geen xenon bevatten.
- Als de losgekoppelde koelval 1 of 4 aangekoppeld wordt,
wordt aangenomen dat deze geen water bevat anders dan de
waterdamp in de lucht die zich in de koelval bevindt.

Ca. 25 maal per seconde wordt m.b.v. de PLC gecontroleerd of de status van een van de hulpfuncties verandert moet worden (bv. na het openen of sluiten van een bepaalde klep). Bij het bepalen van de status van een hulpfunctie wordt van het volgende uitgegaan:

- Als zich in een bepaald compartiment xenon bevindt en de klep naar een aangrenzend compartiment wordt geopend en de druk in dat compartiment wordt hoog, dan bevat het aangrenzende compartiment ook xenon.

-Als de druk in compartiment B gedurende 1 seconde laag* is en de klep naar een aangrenzend compartiment gedurende deze tijd geopend is, dan bevat noch compartiment B, noch het aangrenzende compartiment xenon.

* met laag wordt bedoeld: beneden een bepaalde vooraf ingestelde druk ($2 \cdot 10^{-1}$ mBar)

-Voor de afkoppelbare koelvallen (C1 en C4) ligt dit iets gecompliceerder: omdat deze koelvallen zich in de vloeibare stikstof (LN_2) kunnen bevinden, kan zich in deze koelvallen ook bij een lage druk (vast) xenon bevinden.

Om te controleren of de koelvallen zich niet in de vloeibare stikstof bevinden wordt bij het overhevelen van xenon uit koelval 1 en koelval 4 gecontroleerd of de druk in compartiment B enige tijd hoog is. Hierna moeten zowel P2 als P3 enige tijd geopend zijn (niet noodzakelijkerwijs gelijktijdig) om alle xenon uit C1 resp. C4 in te vangen in C2 en C3. Bij het controleren of aan deze voorwaarden voldaan is wordt gebruik gemaakt van een aantal hulpfuncties.

-Als P8 geopend wordt, wordt er aangenomen dat er water in compartiment A2 komt (hulpfunctie waterinA2 wordt 1).

-Als de druk in compartiment B hoog wordt door een klep naar een aangrenzend compartiment te openen, en dit compartiment bevat geen xenon, dan wordt aangenomen dat er lucht in compartiment B gestroomd is (hulpfunctie luchtinB wordt 1).

-Als de druk in compartiment B gedurende 1 seconde laag is, bevat compartiment B geen lucht en geen xenon.

De hulpfuncties Alleeg, ..., luchtinB worden als volgt geset/gereset (voor een verklaring van de notatie zie pagina 4.9) :

(P5 ^ P7 ^ <u>drukB</u>) gedurende 1 sec	→ Alleeg := 1
	A2leeg := 1
	Bleeg := 1
	WaterinA1 := 0
	WaterinA2 := 0

(P5 ^ P9 ^ $\overline{\text{druk2}}$) gedurende 1 sec → A1leeg := 1
A2leeg := 1
WaterinA1 := 0
WaterinA2 := 0

(P5 ^ $\overline{\text{A2leeg}}$) → A1leeg := 0

(P5 ^ P7 ^ $\overline{\text{drukB}}$) gedurende 1 sec → A2leeg := 1
Bleeg := 1
WaterinA2 := 0

(P5 ^ P9 ^ $\overline{\text{druk2}}$) gedurende 1 sec → A2leeg := 1
WaterinA2 := 0

(P5 ^ $\overline{\text{A1leeg}}$) v (P7 ^ $\overline{\text{Bleeg}}$) → A2leeg := 0

(P1 ^ drukB) → 274 := 1
 $\overline{\text{P1}}$ v C1leeg → 274 := 0
(P1 ^ P2 ^ 274) → 270 := 1
 $\overline{\text{P1}}$ v C1leeg → 270 := 0
(P1 ^ P3 ^ 274) → 271 := 1
 $\overline{\text{P1}}$ v C1leeg → 271 := 0
(P1 ^ $\overline{\text{P2}}$ ^ $\overline{\text{P3}}$ ^ 274 ^
270 ^ 271 ^ $\overline{\text{drukB}}$) gedurende 1 s → C1leeg := 1
Bleeg := 1
274 := 0
270 := 0
271 := 0

idem voor C4leeg (274 → 275, 270 → 272, 271 → 273)

($\overline{\text{Bleeg}}$ ^ P1) → C1leeg := 0
($\overline{\text{Bleeg}}$ ^ P4) → C4leeg := 0

(($\overline{\text{C1leeg}}$ ^ P1) v P2 v P3 v
($\overline{\text{C4leeg}}$ ^ P4) v ($\overline{\text{A2leeg}}$ ^ P7)) ^ drukB → Bleeg := 0

(P8) → waterinA1 := 1
(waterinA1 ^ P5) → waterinA2 := 1
(waterinA2 ^ P5) → waterinA1 := 1
(waterinA1 v waterinA2) =: waterinA

$((C1leeg \wedge P1) \vee (C4leeg \wedge P4) \vee (A2leeg \wedge P7)) \wedge drukB \rightarrow luchtinB := 1$

$\overline{(drukB)}$ gedurende 1 seconde $\rightarrow luchtinB := 0$

hierin betekent: P5 : P5=open , $\overline{P5}$: P5=dicht
drukB : druk=hoog , \overline{drukB} : druk=laag
Bleeg : Bleeg=1 , \overline{Bleeg} : Bleeg=0
274 : hulpfunctie=1 , $\overline{274}$: hulpfunctie=0
^ : logische AND
v : logische OR

4.2.2 Bedrijfstoestanden

Er bestaan een aantal 'bedrijfstoestanden' voor het bedienen van het kleppensysteem. De bedrijfstoestand wordt bepaald door de stand van een drietal schakelaars. Deze schakelaars zijn genoemd: 'niet-bev' (niet beveiligd), 'zuiv' (zuiveren) en ASP (automatisch spoelen). In de 'normale' bedrijfstoestand zijn deze drie schakelaars '0'. De normale bedrijfstoestand wordt gebruikt bij het transporteren van het gas van de koelvallen naar de targethouder en omgekeerd, bij het met de hand uitspoelen van de targethouder en bij het vacuüm-pompen van het kleppensysteem.

Bij het zuiveren van het xenon-gas wordt de schakelaar 'zuiv' aangezet. In deze bedrijfstoestand zijn enkele handelingen toegestaan die in de normale bedrijfstoestand niet geoorloofd zijn: normaliter kan P6 niet geopend worden als P2 of P3 geopend is. In de stand zuiveren kan dit wel, mits één van beide kleppen dicht is en de druk in compartiment B laag is. (Bij het zuiveren worden C2 en C3 in de LN₂ geplaatst waardoor het xenon dat zich hierin bevindt neerslaat. De kleine hoeveelheid lucht die zich in de koelval bevindt, en niet neergeslagen is, kan vervolgens weggepompt worden).

De schakelaars 'niet-bev' en 'ASP' kunnen gecombineerd 4 standen innemen:

- 1) niet-bev=0 ^ ASP=0 → normale bedrijfstoestand
- 2) niet-bev=1 ^ ASP=0 → niet-beveiligd-stand: alle kleppen, de slangen-pomp en de stappenmotor kunnen ten alle tijden met de hand bediend worden zonder controle of de activering geoorloofd is (rechtstreekse doorkoppeling van keuzeschakelaar op het bedieningspaneel (ingang) en bekrachtiging van de desbetreffende klep, pomp of stappenmotor (uitgang)).
- 3) niet-bev=0 ^ ASP=1 → automatisch-spoelen-stand: het automatisch spoelen-proces wordt uitgevoerd (zie § 4.2.5). P5, P7, P8, P9, M0-M4, PI, PU en spoelen kunnen niet meer met de hand bediend worden.
- 4) niet-bev=1 ^ ASP=1 → pauze-stand: alle uitgangen behouden hun huidige stand (kunnen niet veranderd worden). Deze stand van de schakelaars wordt normaliter niet gebruikt, maar als beide schakelaars (per ongeluk) toch in de stand '1' staan wordt elke bediening op het bedieningspaneel genegeerd.

4.2.3 De opbouw van het programma

In fig. 4.2 is schematische de opbouw van het programma van de PLC weergegeven.

Een complete 'listing' van het programma is afgedrukt in APPENDIX A

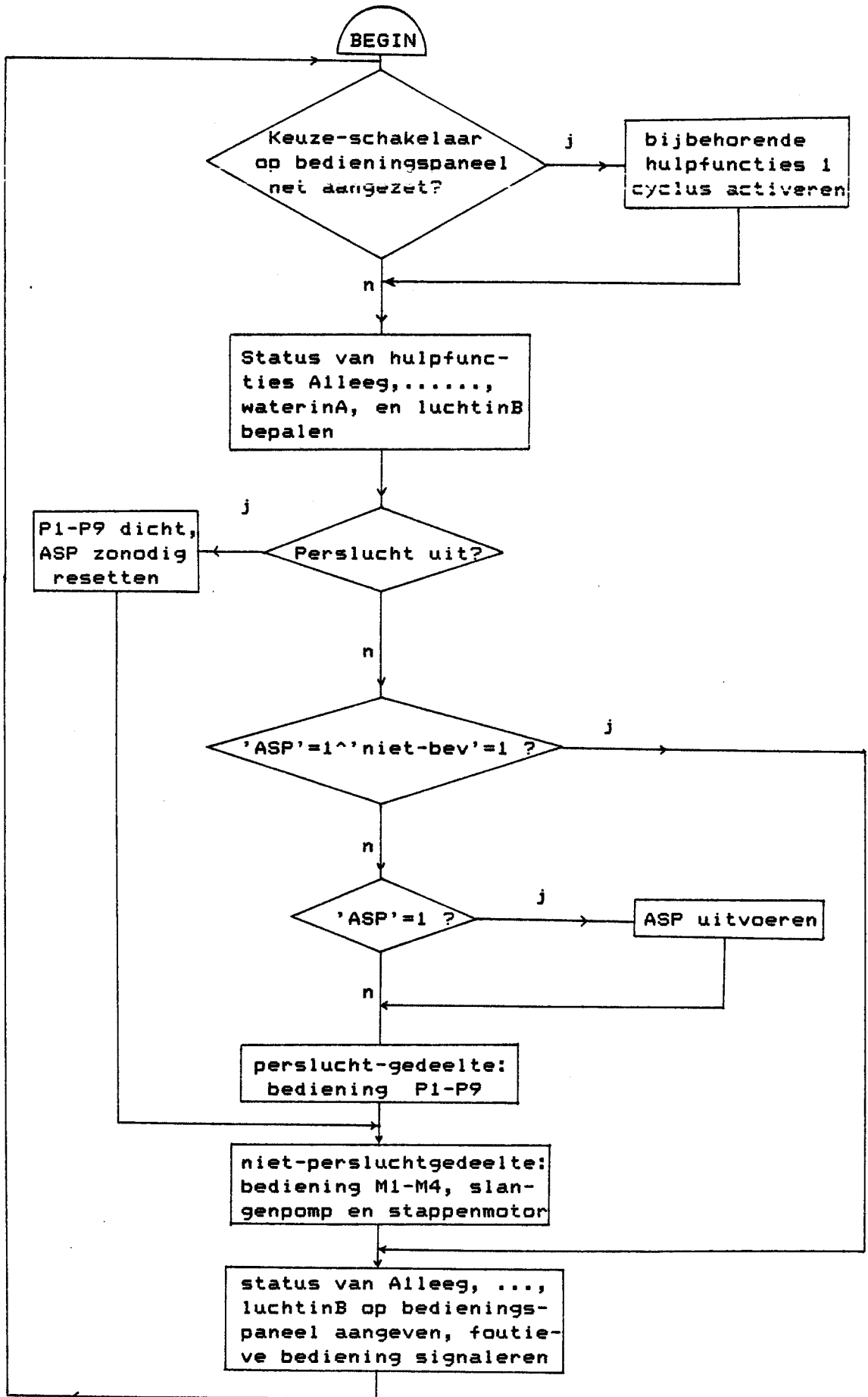


Fig. 4.2 Schematische opbouw van het programma van de PLC

Een toelichting op deze schematische opbouw volgt hieronder.

Tijdens elke 'cyclus' van het programma wordt eerst bepaald of zich xenon, lucht of water in de compartimenten A1, ..., C4 bevindt (de status van de hulpfuncties Alleeg, ..., luchtinB wordt bepaald). Vervolgens wordt gekeken of de pauze-stand of de ASP-stand ingeschakeld is. In het geval dat de pauze-stand is ingeschakeld wordt het gedeelte van het programma waarin de uitgangen bediend worden overgeslagen. In het geval dat de ASP-stand is ingeschakeld wordt gecontroleerd of het automatisch spoelen uitgevoerd mag worden (er mag zich bv. geen xenon in de compartimenten A1 en A2 bevinden en klep M5 moet geopend zijn). Als aan alle voorwaarden is voldaan wordt het automatisch-spoelen-protocol uitgevoerd (zie § 4.2.5).

Als de pauze-stand en de ASP-stand niet zijn ingeschakeld worden de kleppen, de slangenpomp en de stappenmotor 'met de hand' bediend (zie § 4.5.4). Voor het bedienen van de kleppen P1-P9 is het noodzakelijk dat er perslucht aanwezig is. Als om een of andere oorzaak (leidingbreuk, algehele uitval van de perslucht) geen perslucht aanwezig is worden de kleppen P1-P9 gesloten (de corresponderende uitgangen worden '0') en kunnen niet meer bekrachtigd worden totdat de perslucht hersteld is. Bovendien wordt het automatisch-spoelen gereset, indien dit uitgevoerd werd.

Tijdens het uitvoeren van het programma wordt continu de status van de hulpfuncties Alleeg, ..., luchtinB weergegeven op het bedieningspaneel.

4.2.4 Bediening tijdens de normale bedrijfstoestand

Hieronder wordt beschreven wanneer een bepaalde klep geopend mag worden of gesloten moet worden en wanneer de slangenpomp en de stappenmotor (benodigd bij het spoelen van de targethouder) gestart mogen worden of gestopt moeten worden, dit alles in het geval dat de schakelaars 'niet-bev' en 'ASP' uit ('0') zijn.

Afhankelijk van welke kleppen open staan en de status van de in § 4.2 genoemde hulpfuncties kan bepaald worden of een bepaalde klep geopend mag worden, of juist gesloten moet worden. Ook wordt zo bepaald of het pompen en spoelen mag beginnen of moet stoppen.

Voor elk te bedienen 'apparaat' is een keuzeschakelaar (ingang), een bedieningsrelais (uitgang) en een hulpfunctie gereserveerd. De hulpfunctie wordt 1 cyclus actief nadat de keuzeschakelaar geactiveerd is. Binnen deze cyclus wordt beslist of de bijbehorende uitgang geactiveerd mag worden. Indien dit het geval is wordt het betreffende bedieningsrelais bekrachtigd. Als de uitgang niet bekrachtigd mag worden, wordt een waarschuwingssignaal gegeven. Na deze cyclus wordt de uitgang nooit bekrachtigd.

Als een klep dicht moet, of als de slangenpomp of de stappenmotor gestopt moeten worden wordt de betreffende uitgang gereset ('0' gemaakt).

In de normale bedrijfstoestand mogen kleppen altijd gesloten en pompen en spoelen altijd gestopt worden.

Hieronder wordt uiteen gezet wanneer een klep geopend mag worden, of gesloten moet worden in de normale bedrijfstoestand (voor de andere bedrijfstoestanden wordt verwezen naar § 4.2.3).

$$(\overline{P6} \wedge \overline{P7}) \vee (\overline{P6} \wedge \overline{P8} \wedge \overline{P9} \wedge \overline{\text{waterinA}}) \rightarrow \begin{array}{l} P1 \text{ mag open} \\ P4 \text{ mag open} \end{array}$$

(Bij het openen van P1 of P4 mag zich wel lucht in compartiment B bevinden omdat C1 en C4 na aankoppeling zelf lucht kunnen bevatten).

$$(\text{zuiv} \vee \overline{\text{Bleeg}} \vee \overline{\text{luchtinB}}) \wedge P1 \text{ mag open} \rightarrow \begin{array}{l} P2 \text{ mag open} \\ P3 \text{ mag open} \end{array}$$

(Als zuiv=0 en er bevindt zich wel lucht, maar geen xenon in compartiment B dan mogen P2 en P3 niet geopend worden, maar moet eerst compartiment B vacuüm gepompt worden).

$(\overline{A1leeg} \vee \overline{A2leeg}) \wedge \overline{P6} \wedge \overline{P8} \wedge \overline{P9} \wedge$
 $\overline{waterinA} \wedge P7 \vee A1leeg \quad \rightarrow P5 \text{ mag open}$

(Als zich xenon in compartiment A1 bevindt, moet P7 geopend zijn alvorens P5 geopend kan worden, dit om te voorkomen dat de druk in het leidingen-systeem te hoog oploopt).

$(P8 \vee P9 \vee \overline{waterinA}) \wedge \overline{A1leeg} \quad \rightarrow P5 \text{ moet dicht}$

$[(\overline{P1} \vee \overline{C1leeg}) \wedge \overline{P2} \wedge \overline{P3} \wedge (\overline{P4} \vee \overline{C4leeg})$
 $\wedge \overline{zuiv}] \vee [(\overline{P2} \vee \overline{P3}) \wedge \overline{drukB} \wedge \overline{zuiv}] \vee$
 $\wedge [(\overline{A2leeg} \wedge \overline{waterinA} \wedge \overline{P8} \wedge \overline{P9}) \vee \overline{P7}]$
 $\wedge \overline{Bleeg} \quad \rightarrow P6 \text{ mag open}$

$[((P1 \wedge \overline{C1leeg}) \vee P2 \vee P3 \vee (P4 \wedge \overline{C4leeg}))$
 $\wedge \overline{zuiv}] \vee [((P2 \wedge P3) \vee \overline{drukB}) \wedge \overline{zuiv}]$
 $\vee [(\overline{waterinA2} \vee \overline{A2leeg} \wedge P8 \wedge P9) \wedge P7]$
 $\vee \overline{Bleeg} \quad \rightarrow P6 \text{ moet dicht}$

$\overline{P6} \wedge \overline{P8} \wedge \overline{P9} \wedge \overline{waterinA} \wedge \overline{luchtinB} \quad \rightarrow P7 \text{ mag open}$

$(P6 \wedge \overline{A2leeg}) \vee P8 \vee P9 \vee \overline{waterinA} \quad \rightarrow P7 \text{ moet dicht}$

$A1leeg \wedge A2leeg \wedge \overline{P7} \wedge \overline{P9} \quad \rightarrow P8 \text{ mag open}$

$\overline{A1leeg} \vee \overline{A2leeg} \vee P7 \vee P9 \quad \rightarrow P8 \text{ moet dicht}$

$\overline{P7} \wedge \overline{P8} \wedge A2leeg \quad \rightarrow P9 \text{ mag open}$

$P7 \vee P8 \vee \overline{A2leeg} \quad \rightarrow P9 \text{ moet dicht}$

$(M1 \vee M2 \vee M3) \wedge \overline{M4} \wedge M5 \wedge$
 $P8 \wedge \overline{P7} \wedge \overline{P9} \quad \rightarrow \text{pomp mag aan}$

$\overline{\text{pomp mag aan}} \quad \rightarrow \text{pomp moet uit}$

$\overline{P5} \quad \rightarrow \text{spoelen mag aan}$

$P5 \quad \rightarrow \text{spoelen moet uit}$

M1, M2, M3 en M4 mogen altijd geopend worden.

Er wordt door het programma van de PLC een beperking opgelegd aan de bedieningsvrijheid bij het manipuleren met de spoelvloeistof:

- Water in compartiment A1 en A2 moet via P8 en P9 weggepompt worden: zo wordt voorkomen dat er water in compartiment B komt.
- In- en uitpompen van water is alleen mogelijk als alle kleppen tussen het spoelvloeistof-flesje en de targethouder geopend zijn (beveiliging tegen druk-opbouw in het kleppen-systeem).
- Het roteren van de targethouder (spoelen) is alleen mogelijk als P5 gesloten is.

4.2.5 Beschrijving van het automatisch spoelen

Het doel van het automatisch spoelen is het in de targethouder gevormde ¹²³I m.b.v. spoelvloeistof uit de targethouder te spoelen en in 3 opvangflesjes te pompen. Daar dit proces vrij veel tijd in beslag neemt (\pm 1.30 uur) is een voorziening aangebracht om dit hele proces automatisch uit te voeren. Bij het automatisch spoelen wordt een gedeelte van het programma in de PLC uitgevoerd waarbij achtereenvolgens de volgende handelingen worden verricht:

P8, P5 en M4 worden geopend (de targethouder wordt belucht). Na 1,5 s wordt M4 gesloten.

M1 wordt geopend en de spoelvloeistof wordt uit het 1^e flesje in de targethouder gepompt.

Na 270 s wordt het inpompen gestopt en P5 wordt gesloten. Dan wordt gedurende 900 s gespoeld (de targethouder wordt rond gedraaid). Vervolgens wordt gewacht op het signaal 'rotklaar', dat door de stappenmotor-driver gegenereerd wordt als de targethouder gestopt is in de uiterste stand (met de koelvinger omhoog).

Na het ontvangen van dit signaal wordt P5 weer geopend en de spoelvloeistof gedurende 260 s uit de targethouder in het 1^e

opvangflesje teruggepompt.

Hierna wordt de targethouder, die zich op onderdruk bevindt, weer 1,5 s belucht en M1 wordt gesloten.

Dit hele proces herhaalt zich met de spoelvlloeistof uit flesjes 2 en 3.

Na deze 3 cycli worden P8 en M4 gesloten en het is automatisch spoelen-proces beëindigd.

4.3 Beknopte handleiding bij de PLC

Hieronder is summier een overzicht gegeven van de werking en de bediening van de PLC. Voor een uitgebreidere handleiding wordt verwezen naar de handleiding bij de Mitsubishi 'F-40MR-ES/F-20P-E' PLC (MIT 85).

Functie	MONITOR/PROG schak.		RUN/STOP schak.	
	MONITOR	PROG	RUN	STOP
Programma controleren	X		X	
Status controleren	X		X	(X)
Programma invoeren/lezen		X	(X)	X

●123 = regelnr.

123 = adres / status van tel-,tijdfunctie

Geheugen wissen :CLEAR;STEP 0;STEP 889;DEL.

Programmeren :CLEAR;INSTR;LD 401;WRITE
(;INSTR→invoegen)

Programma lezen :CLEAR;INSTR;STEP(+/-).

Sprong naar regelnr. :CLEAR;STEP 3;INSTR.

Zoeken naar instructie :CLEAR;OUT 430;SEARCH(;SEARCH..).

Wisselen regelnr.↔ instructie :STEP ↔ INSTR

Status testen ●/0 :CLEAR;adresnr;MONITOR;STEP(+/-) → op-
volgend/vorige adres.
:CLEAR;adresnr;SEARCH;MONITOR;STEP(+/-)
(;STEP → regelnr.;MONITOR) → opvolgende
regelns.

Functie = geheugenbit (aan/uit). (na elke instructie wordt ahw.
een statusbit gezet of gereset)

volgende instructie	status=1	status=0
OUT	OUT:=1	OUT:=0
RST	RESET teller/schuifreg.	overslaan
SFT	SHIFT schuifregister	overslaan
PLS	PULSE (1 cyclus actief)	overslaan
NOP 723	sprong naar regel na END 723	overslaan

Tijdfunctie : LD 400; OUT 450; K 12 : als ingang 400 12 sec. 1 is wordt timer 450 actief (de timer wordt reset als stuuradres 400 0 wordt).

Counter : LD 400; OUT 460; K 3 : als ingang 400 3 maal een opgaande flank ondergaat wordt counter 460 actief. Resetten gebeurt via RST 460.

Conditionele sprong: NOP 723 / END 723 (als bij het uitvoeren van de instructie NOP 723 geldt: status=1 , dan wordt gesprongen naar de regel die staat na de regel waar END 723 staat). Tellers voor END 723 behouden de waarde die ze voor de sprong hadden. Tijdfuncties voor END 723 werken alleen door als ze tijdens de sprong actief waren.

Controleren of sprong actief is : zoek instructie op die voor NOP 723 staat; STEP(+) → status naast NOP (*/0)

5 STRALINGSVEILIGHEIDSASPECTEN

5.1 Risicoanalyse

5.1.1 Radionucliden-inventarisatie

Tijdens de produktie van ^{123}I worden als gewenste radionucliden ^{123}Cs , ^{123}Xe en ^{123}I geproduceerd. Via nevenreacties wordt verder als radionuclidische verontreiniging ^{120}I , ^{121}I en ^{125}I geproduceerd. De dochterkernen van ^{120}I en ^{125}I zijn stabiel, de dochterkernen van ^{121}I (^{121}Te) en van ^{123}I (99,995% ^{123}Te en $5 \cdot 10^{-3}\%$ ^{123m}Te) zijn radioactief. ^{123}Te zendt geen β - of γ -straling uit en heeft een halveringstijd die zo groot is (10^{13} jaar) dat dit nuclide in de risicoanalyse niet wordt meegenomen.

In tabel 5.1 zijn van de verschillende radionucliden de halveringstijden en gamma-dosis-constanten (Γ) vermeld, alsmede de uitgezonden straling, opgesplitst in γ -straling, β -straling en conversie-elektronen. De numerieke waarde van de gamma-dosis-constante is gelijk aan het dosisequivalent-tempo t.g.v. een puntbron van een bepaald radionuclide met een activiteit van 1 GBq, gemeten op een afstand van 1 meter. Er is een programma geschreven waarmee de activiteit van ^{123}Cs , ^{123}Xe en ^{123}I berekend kan worden van BOB tot 40 uur na BOB (zie BUR 86).

In fig. 5.2 is als functie van de tijd na BOB uitgezet de activiteit van ^{123}Cs , ^{123}Xe en ^{123}I die geproduceerd wordt bij een 'gemiddelde' produktie. Een 'gemiddelde' produktie bestaat uit twee deel-bestralingen, een van 5 uur en een van 2 uur, terwijl de tijd tussen de bestralingen 2 uur bedraagt. Het xenon wordt een half uur na EOB 2 teruggewonnen in 123-I-koelval-1 en 8 uur daarna wordt het xenon overgebracht van 123-I-koelval-1 naar 123-I-koelval-2. De bundelstroom bij beide bestralingen is $30 \mu\text{A}$.

In fig. 5.3 is de activiteit van het ^{123}I afzonderlijk uitgezet als functie van de tijd na BOB, opgesplitst naar de plaats waar het ^{123}I zich bevindt (targethouder, 123-I-koelval-1, 123-I-koelval-2).

Nuclide	T _{1/2}	E _γ (keV)	Y (%)	E _{β⁺} (keV)	Y (%)	conv.el (keV)	Y (%)	Γ mSv m ² GBq.h
¹²⁰ I	1,35 h	560	73,0	1131	8,2			0,2240
		511	162,0	1542	8,9			
		601	5,8	1561	3,3			
		641	9,1	1845	37,8			
		1523	11,2	2099	19,0			
¹²¹ I	2,12 h	212	84,5	509	12,0	181	6,2	0,0497
		511	24,9					
		532	6,1					
		599	1,5					
¹²¹ Te	17,0 d	471	1,4					0,0835
		508	17,7					
		573	80,3					
¹²³ Cs	6 m	83	2,7	1000	75,0			0,1448
		97	13,0					
		307	2,7					
		511	150,0					
		596	7,4					
		1276	2,8					
¹²³ Xe	2,08 h	149	48,7	593	1,1	115	16,1	0,0288
		178	15,3	661	3,9	144	4,0	
		330	8,6	674	16,2			
		511	44,0					
		900	2,5					
		1093	2,8					
		1113	1,6					
		1807	1,2					
¹²³ I	13,2 h	159	82,8			127	3,5	0,0423*
		346	0,1			155	1,7	
		440	0,4					
		505	0,3					
		529	1,4					
		539	0,4					
^{123m} Te	119,7 d	159	84,2			57	42,7	0,0166
						84	57,2	
						127	13,7	
						154	1,7	
¹²⁵ I	60,1 d	35	6,7			36	82,6	0,0638*
						31	17,4	

Tabel 5.1 Fysische eigenschappen van een aantal relevante radionucliden (gegevens ontleend aan ICR 83).

* Bij ¹²³I en ¹²⁵I is ook de röntgenstraling meegenomen bij de berekening van Γ, omdat de bijdrage hiervan groter is dan die van de γ-straling.

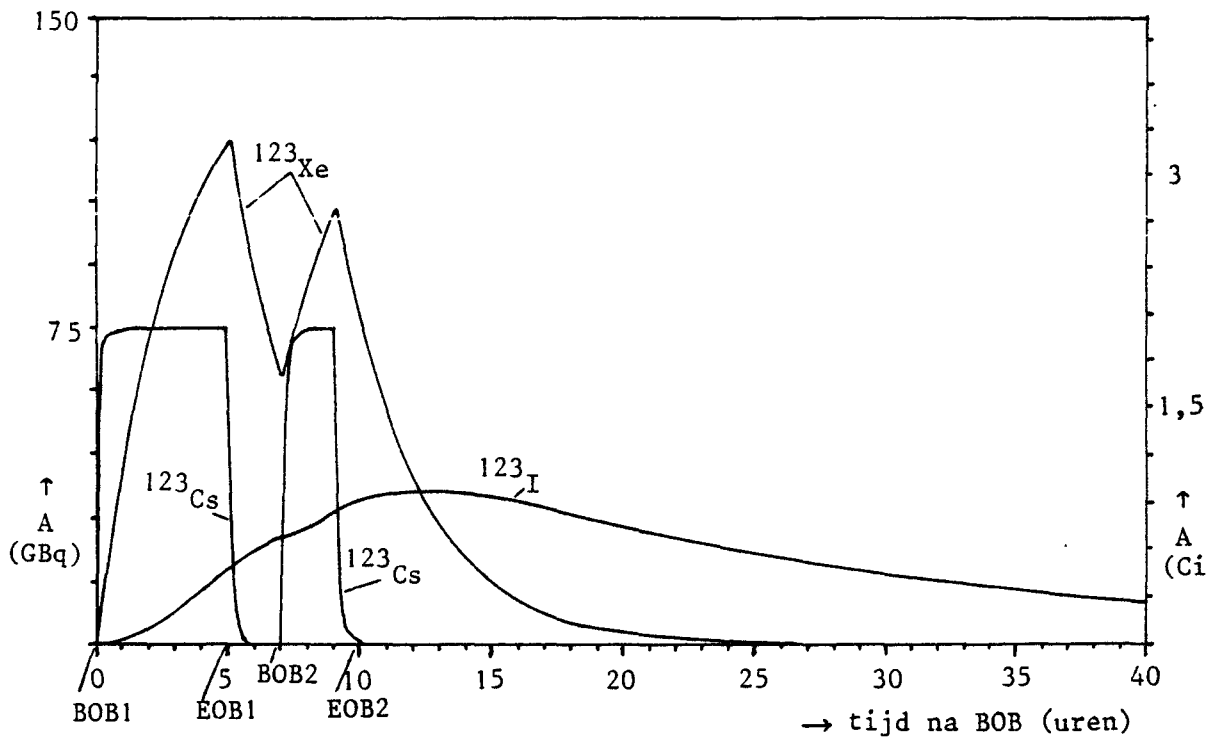


Fig. 5.2 Activiteit van de radionucliden ^{123}Cs , ^{123}Xe en ^{123}I als functie van de tijd na BOB bij een 'gemiddelde' produktie.

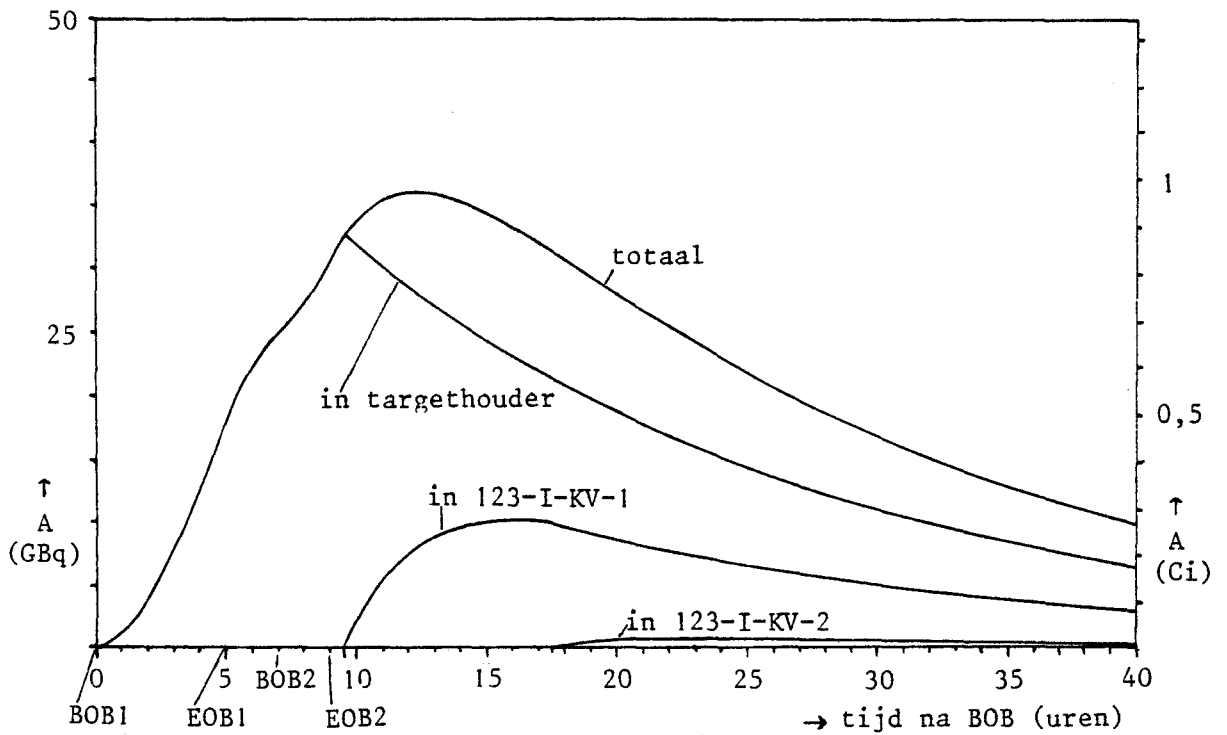


Fig. 5.3 Activiteit van ^{123}I als functie van de tijd na BOB bij een 'gemiddelde' produktie.

Om een risicoanalyse te kunnen maken is het o.a. noodzakelijk de activiteit van de diverse radionucliden te weten als functie van de tijd. In tabel 5.4 zijn de activiteiten van de belangrijkste Cs, Xe en I-radioisotopen vermeld als functie van de tijd na EOB (bij een 'gemiddelde' bestraling).

tijd na EOB (uur)	^{120}I	^{121}I	^{123}I	^{123}Xe	^{123}Cs
0	1,8	4,9	30,83	102,9	74,0
1	1,1	3,6	33,9	76,3	0,073
3	0,4	1,9	36,0	39,2	0
6	0,08	0,7	34,3	14,4	0
9	0,018	0,3	30,6	5,31	0
12	$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,10	26,7	1,95	0
24	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	14,4	0,036	0
36	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	7,7	0,0007	0

Tabel 5.4 Activiteit (in GBq) van de verschillende radionucliden als functie van de tijd na EOB. De activiteiten van ^{125}I , ^{121}Te en $^{123\text{m}}\text{Te}$ (op 36 uur na EOB) zijn resp. ca. 0,001%, 0,015% en $2 \cdot 10^{-5}\%$ van de ^{123}I -activiteit, gemeten op EOB.

^{123}Cs kan, zelfs bij incidenten, niet of nauwelijks in de lucht verspreid worden omdat het aan de wand van de targethouder gehecht is; bovendien is de halveringstijd zo kort dat bij het uitspoelen van de targethouder het ^{123}Cs al grotendeels is vervallen naar ^{123}Xe .

De I-isotopen bevinden zich grotendeels op de wand van de targethouder (vóór het uitspoelen) of opgelost in water (tijdens en na het uitspoelen), zodat inhalatie vrijwel uitgesloten is.

^{123}Xe kan zich in de bestralingsbunker of de bundelzaal verspreiden als het via een vacuümpomp uit de opstelling gepompt zou worden. Dit ^{123}Xe zou dan aanleiding geven tot uitwendige bestraling (submersion, zie WEB 84). Bovendien vervalt het ^{123}Xe naar ^{123}I , dat neerslaat op de wanden in de bundelzaal, of op stofdeeltjes die geïnhaled kunnen worden. De ^{123}I -activiteit zal na het ontsnappen van het xenon ingroeien tot

een maximale waarde, die na ca. 7 uur bereikt wordt. De maximale ^{123}I -activiteit na het ontsnappen van 1 Bq ^{123}Xe is ca. 0,1 Bq.

Behalve in de activiteit van een bepaald nuclide is men uit stralingshygiënisch oogpunt vooral geïnteresseerd in de radiotoxiciteit van dat nuclide. Hiertoe is het begrip ALI (Annual Limit on Intake) geïntroduceerd: inname van een hoeveelheid radionuclide ter grootte van 1 ALI resulteert in een volg-dosis-equivalent van 50 mSv (5 rem), de jaardosislimiet (voor een iets exactere definitie van de ALI wordt verwezen naar WEB 84). De radiotoxiciteit van een nuclide is in dit rapport gedefiniëerd als het quotiënt van de activiteit en de ALI-waarde voor dat nuclide (zie DOS 84). Er kan zowel voor orale inname als voor inhalatie een ALI-waarde bepaald worden. In het vervolg zal steeds gebruikt gemaakt worden van de ALI_{inh} omdat inhalatie de meest waarschijnlijke vorm van inname van radioactiviteit is.

Voor gasvormige elementen (zoals bv. ^{123}Xe) is geen ALI-waarde gedefiniëerd omdat de stralingsbelasting t.g.v. deze elementen wordt bepaald door externe bestraling (submersion). Er wordt bij deze elementen gebruik gemaakt van een DAC-waarde (Derived Air Concentration): Wanneer men een jaar (50 weken van 40 uur) zou doorbrengen in een ruimte waar de concentratie van een bepaald radionuclide gelijk is aan de DAC-waarde, dan loopt men een dosis van 50 mSv op. Om de DAC-waarde in verband te brengen met ALI-waarde wordt de DAC-waarde vermenigvuldigd met 2500 (per jaar wordt ca. 2500 m³ lucht ingeademd).

In tabel 5.5 zijn de ALI-waarden van de radionucliden vermeld. In fig. 5.6 is de radiotoxiciteit van de relevante radionucliden als functie van de tijd weergegeven.

Alle radionucliden zijn ingedeeld in radiotoxiciteitsgroepen (WEB 84). Afhankelijk van de ALI-waarde van een nuclide en de specifieke activiteit van het dragervrije nuclide (die voornamelijk bepaald wordt door de halveringstijd) wordt het nuclide ingedeeld in radiotoxiciteitsgroep 4 (lage radiotoxiciteit), 3 (matige radiotoxiciteit), 2 (hoge radiotoxiciteit) of 1 (zeer hoge radiotoxiciteit).

^{125}I is ingedeeld in radiotoxiciteitsgroep 2, ^{123}Cs , ^{123}Xe , ^{123}I , ^{121}Te en $^{123\text{m}}\text{Te}$ in radiotoxiciteitsgroep 3, ^{120}I en ^{121}I in radiotoxiciteitsgroep 4.

Nuclide	ALI oraal (Bq)	ALI inhal (Bq)
^{120}I	$1 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$
^{121}I	$4 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$
^{121}Te	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
^{123}Cs	$2 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^9$
^{123}Xe		$1,5 \cdot 10^{10}$
^{123}I	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$
$^{123\text{m}}\text{Te}$	$2 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^6$
^{125}I	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$

Tabel 5.5 ALI-waarden van de betrokken radionucliden (IRC 79).

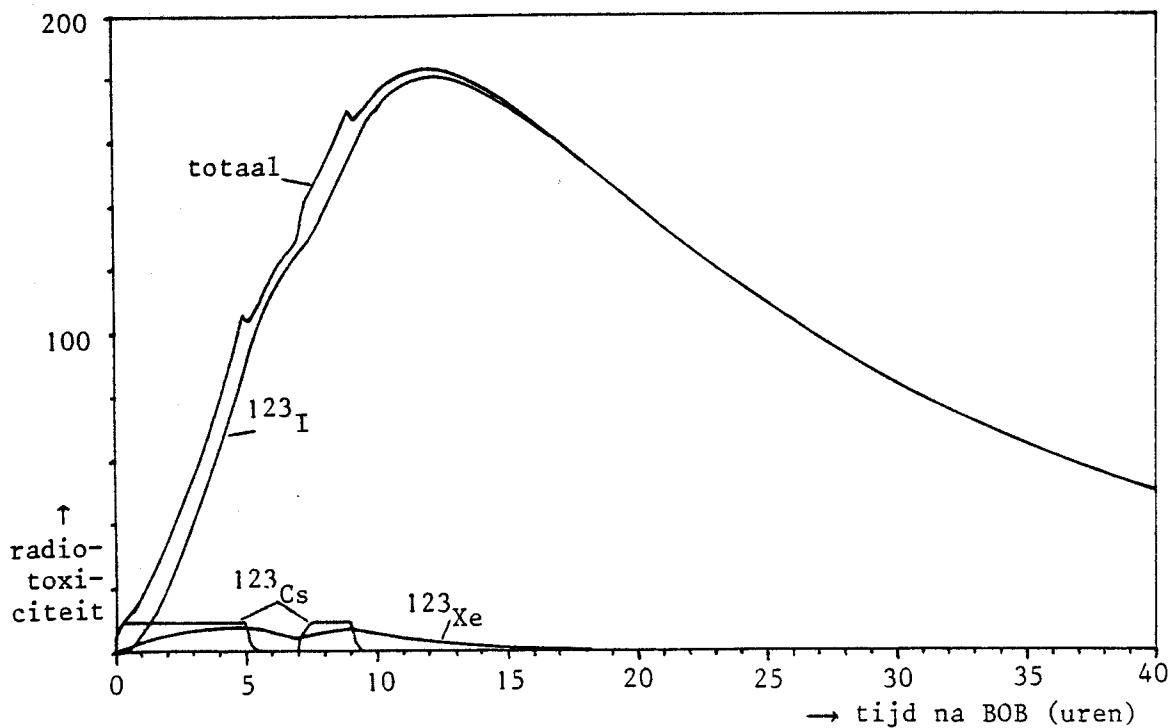


Fig. 5.6 Radiotoxiciteit van de nucliden ^{123}I , ^{123}Xe en ^{123}Cs als functie van de tijd na BOB bij een 'gemiddelde' produktie'. De radiotoxiciteit van ^{120}I en ^{121}I is ongeveer even groot als die van ^{123}Xe .

5.1.2 Activering van de targethouder en de metaal-folies

Door protonen die in het nikkel afgeremd worden en door neutronen die bij de kernreacties op ^{124}Xe gevormd worden wordt de targethouder geactiveerd. Ook beide (Molybdeen) metaal-folies worden geactiveerd.

Als er regelmatig bestralingen plaats vinden bestaat de mogelijkheid dat de activering zich opbouwt: de lang-levende radionucliden (met een halveringstijd $T_{1/2}$ groter dan ca. 1 dag) zijn nog niet geheel vervallen als de volgende bestraling begint. De mate van opbouw van de activering t.g.v. een bepaald nuclide wordt bepaald door de verhouding $T_{1/2}/T_t$, waarbij T_t de tijd tussen 2 bestralingen is.

De activiteit van een bepaald nuclide na n identieke bestralingen wordt gegeven door:

$$A(n) = A_1 \cdot \frac{1-a^n}{1-a}, \text{ waarin:}$$

$$A_1 = \text{activiteit na } 1^{\text{e}} \text{ bestraling} = A_{\infty} \{1 - \exp(-\lambda T_b)\} = P \{1 - \exp(-\lambda T_b)\}$$

$$A_{\infty} = \text{activiteit na een oneindig lange bestraling}$$

$$P = \text{productietempo (aantal nucliden dat per seconde gevormd wordt tijdens de bestraling, zie BUR 86)}$$

$$\lambda = \text{vervalconstante van het nuclide } (\lambda = \ln 2 / T_{1/2})$$

$$T_b = \text{bestralingsduur}$$

$$a = \exp(-\lambda T_t)$$

$$T_t = \text{tijd tussen 2 bestralingen (gemeten van EOB tot EOB)}$$

De evenwichtsactiviteit, de activiteit na oneindig veel bestralingen wordt gegeven door:

$$A_{ev} = A_1 / \{1 - \exp(-\lambda T_t)\}$$

Het aantal bestralingen dat uitgevoerd moet worden opdat de activiteit gelijk is aan de helft van de evenwichtsactiviteit, $n_{1/2}$, is gelijk aan $\ln(0,5) / \ln(a) = T_{1/2} / T_t$.

In tabel 5.7 zijn van diverse radionucliden de aangemaakte activiteiten t.g.v. de protonenbestraling na één bestraling (A_1) en na oneindig veel bestralingen (A_{ev}) vermeld. Er is uitgegaan van 3 bestralingen van 7 uur (met $I=30\mu\text{A}$) per week.

Verder is het dosisequivalenttempo op een afstand van 1 m berekend dat veroorzaakt wordt door deze radionucliden (wederom na één bestraling (\dot{H}_1) en na oneindig veel bestralingen (\dot{H}_{ev})). Het dosisequivalenttempo is berekend voor een situatie waarbij het geactiveerde voorwerp wordt afgeschermd door 4 mm nikkel en 5 mm aluminium. Om het dosistempo te berekenen indien de afscherming niet aanwezig is (relevant bij het manipuleren met de folies) kan gebruik gemaakt worden van de getabelleerde gamma-dosis-constanten. Het dosistempo \dot{H} wordt gegeven door $\dot{H} = \Gamma \cdot A / r^2$, waarbij r de afstand is tot het geactiveerde voorwerp.

Bij de berekening van de activering van het nikkel is aangenomen dat alle protonen (met een energie van 26 MeV) volledig in het nikkel gestopt worden (dit is een overschatting). Gegevens over de werkzame doorsnede van de verschillende Ni-isotopen zijn ontleend aan BER 84. De activering van het nikkel door neutronen is niet berekend omdat gegevens over de neutronenflux ter plaatse van de targetherouder niet bekend zijn.

De activering van de molybdeen folies is gemeten door een folie gedurende 20 minuten te bestralen met 26 MeV protonen en daarna een aantal malen het gamma-spectrum te meten (na 3 uur en na 2, 5 en 9 dagen) en te analyseren.

Behalve de targetherouder en de folies zullen ook alle aluminium voorwerpen in de buurt van de targetherouder (koelmantel, BGS, tafel) geactiveerd worden door neutronen (hierbij ontstaat vooral ^{24}Na met een halveringstijd van 15 uur).

Tenslotte is in tabel 5.7 ook de waarde van $n_{1/2}$ vermeld.

nuclide	T _{1/2} (uur)	A ₁ (GBq)	A _{ev} (GBq)	n _{1/2}	Γ mSv m ² GBq.h	H ₁ (mSv/h)	H _{ev} (mSv/h)
Co-55	17,54	7,3	8,2	0,31	0,2619	1,32	1,49
Co-56	1890	0,021	1,04	33,7	0,4354	0,0071	0,35
Co-57	6501	0,37	63,5	116,1	0,0252	0,0019	0,31
Co-58	1699	0,0083	0,37	30,3	0,1430	0,0009	0,038
Co-60	46173	0,00005	0,060	824,5	0,3368	0,0000	0,016
Co-61	1,65	2,7	2,67	0,029	0,0083	0,0021	0,0021
Ni-57	36,08	17,5	26,5	0,64	0,2605	3,43	5,20
Cu-60	0,386	31,2	31,2	0,007	0,4665	11,00	11,00
Cu-61	3,408	7,8	7,8	0,06	0,1072	0,55	0,55
Cu-64	12,70	1,22	1,28	0,23	0,0301	0,025	0,025
Zr-89	78,43	0,0037	0,0095	1,40	0,1697	0,0004	0,0011
Nb-90	14,6	0,029	0,031	0,26	0,4110	0,0063	0,0067
Nb-92m	243,6	0,0011	0,0077	4,35	0,1362	0,0001	0,0008
Nb-96	23,35	0,011	0,014	0,42	0,3321	0,0026	0,0032
Mo-93m	6,58	0,019	0,019	0,12	0,3150	0,0044	0,0045
Mo-99	66,0	0,019	0,043	1,18	0,0202	0,0004	0,0008
Tc-93	2,75	1,49	1,49	0,049	0,1855	0,22	0,22
Tc-93m	0,725	0,14	0,14	0,013	0,0882	0,0094	0,0094
Tc-94	4,883	0,99	0,99	0,087	0,3700	0,26	0,26
Tc-95	20,0	0,51	0,60	0,36	0,1157	0,043	0,050
Tc-96	102,7	0,20	0,63	1,83	0,3640	0,053	0,17
Tc-96m	0,858	2,86	2,86	0,015	0,0022	0,0043	0,0043

Tabel 5.7 Aangemaakte activiteiten en dosisequivalenttempi op 1 m t.g.v. de bestraling van nikkel en een molybdeen-folie met 26 MeV protonen.

In fig. 5.8 is het dosisequivalenttempo dat veroorzaakt wordt door ⁵⁵Co, ⁵⁷Ni, ⁶⁰Cu en ⁶¹Cu grafisch weergegeven gedurende de periode van de eerste 5 bestralingen (dan is ruim de 70% van de evenwichtsactiviteit bereikt). De bijdrage van de overige nucliden varieert van minder dan 15% gedurende de eerste bestralingen tot minder dan 30% na oneindig veel bestralingen.

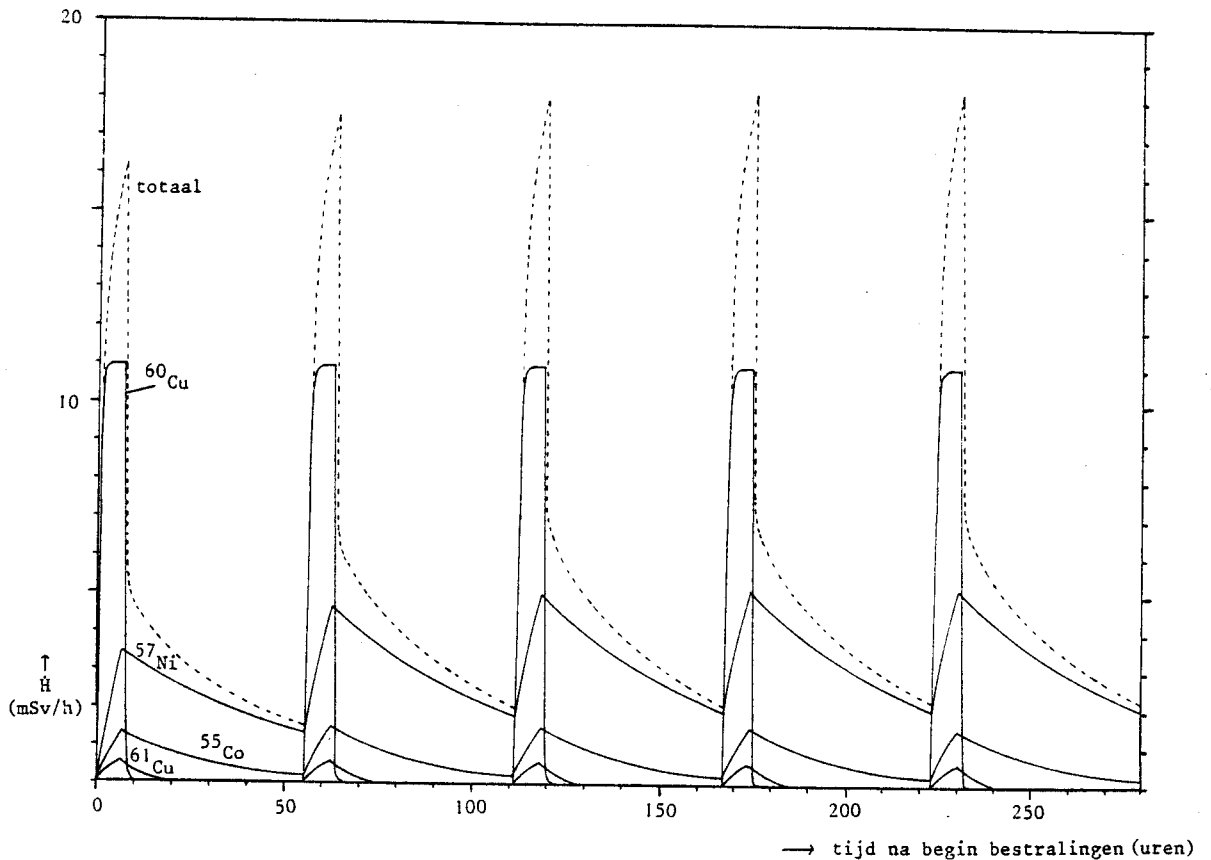


Fig 5.8 Dosisequivalenttempo op 1 m (bij een afscherming bestaande uit 4 mm Ni en 5 mm Al) ten gevolge van de activering van de targethouder gedurende de periode van de eerste 5 bestralingen.

5.1.3 Radioactief afval

Bij een eventuele vervanging van de targethouder is deze zodanig geactiveerd door radioisotopen met een lange halveringstijd (mn. ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co en ^{60}Co), dat de geactiveerde targethouder aan het radioactief afval verwerkend bedrijf COVRA moet worden aangeboden. De activiteiten van de verschillende nucliden kunnen in tabel 5.7 afgelezen worden in de kolom A_{ev} .

Verder ontstaat bij het opwerken van ^{123}I als lang-levend

radioactief 'afval' ^{123m}Te . Per MBq ^{123}I ontstaat na verval ca. 4,7 kBq ^{123m}Te . Dit ^{123m}Te wordt grotendeels met het ^{123}I aan patiënten toegediend of ontstaat na het toedienen van ^{123}I in de patiënt.

5.2 Overzicht veiligheidsmaatregelen

5.2.1 Inrichting als C-laboratorium

Er is naar gestreefd de bestralings-bunker zodanig in te richten dat voldaan is aan de eisen die aan een radiologisch C-laboratorium gesteld worden, zoals het aanbrengen van een goed te reinigen vloer (naadloos PVC), een werktafel van al uminium en gladde afgewerkte wanden.

In de nabije toekomst zal een goed te reinigen wand aangebracht worden die ook de leidingen en snoeren grotendeels afschermt tegen een mogelijke oppervlaktebesmetting. Volgens de Regeling Stralingshygiëne THE is de bestralings-bunker ingedeeld in de hoogste risicoklasse (klasse IV).

5.2.2 Voorkomen verspreiding van radioactiviteit

Inwendige besmetting kan voorkomen worden als onder alle omstandigheden zorg gedragen wordt voor een goed containment: het moet onmogelijk gemaakt worden dat zich radioactiviteit in het milieu verspreidt.

Als aangenomen wordt dat het messing kleppensysteem lekdicht is zijn de enige mogelijkheden waarop radioactiviteit in het milieu kan komen (zie fig. 2.2):

- 1) Bij een dubbele foliebreuk (target-folie + bufferruimte-folie) kan tijdens de bestraling ^{123}Xe via het BGS en de (olie-diffusie-) vacuümpomp in bunker 1 in de lucht worden

geloosd.

- 2) Bij een lek of breuk van het targetfolie bevindt een deel van het ^{123}Xe zich in de bufferruimte. Via vacuümpomp 1 of persluchtklep P12 zou dit xenon in het milieu geloosd kunnen worden.
- 3) ^{123}Xe uit de targethouder kan via de vacuümpompen die aangesloten zijn op het kleppensysteem (POMP 1 en POMP 2) in bunker 3 geloosd worden.
- 4) Bij het uitspoelen van de targethouder kan ^{123}I , ^{120}I , ^{121}I en eventueel een kleine hoeveelheid ^{123}Xe en ^{123}Cs in het milieu terecht komen als een van de slangen naar de spoelflesjes loslaat of scheurt, of als op andere wijze de verbinding tussen de slangenpomp en de spoelflesjes onderbroken wordt.
- 5) Bij het verwijderen van de afkoppelbare koelvallen (123-I-KV-1 en 123-I-KV-2) kan ^{123}Xe uit het kleppensysteem of uit de koelvallen ontsnappen als de persluchtkleppen P1 en P4 of de handkranen H1 en H4 niet gesloten zijn.

De kans op een radiologische besmetting is echter niet zo groot als men op grond van bovengenoemde punten zou kunnen denken:

- Ad 1) Het blijkt dat Xe goed oplost in olie, zodat bij een dubbele foliebreuk het xenon ingevangen wordt in de vacuümpomp. Het is mogelijk het xenon uit de olie terug te winnen door helium door de olie te leiden en het He-Xe-mengsel op te vangen en te zuiveren.
- Ad 2) Na een Xe-inlek in de bufferruimte wordt het Xe teruggewonnen in de extra koelval alvorens P12 of VK1 te openen. P10 is tijdens de bestraling gesloten zodat dan geen xenon uit de bufferruimte in het milieu gebracht kan worden.
- Ad 3) Door de beveiliging m.b.v. de PLC is het onmogelijk om aan de targethouder te pompen als zich hierin nog Xe bevindt. Wel is het mogelijk zeer kleine hoeveelheden

^{123}Xe (ca. 5 mCi) en ^{123}I (ca. 30 μCi), die ontstaan zijn door verval van ^{123}Cs ná het terugwinnen van het xenon in 123-I-KV-1, weg te pompen. Daarom is aan de uitgang van vacuümpomp 2 een lange slang (10 m) met een actief koolfilter bevestigd. Het volume van het gas waarin het ^{123}Xe zich bevindt is zo klein dat dit Xe in de slang vervalt, voordat via het koolfilter de buitenlucht bereikt kan worden. Eventueel weggepompt ^{123}I wordt ingevangen in het koolfilter.

Ad 4) Om te voorkomen dat spoelvloeistof in het milieu terecht komt is het aan te bevelen om een box om de slangenpomp en de spoelflesjes te bouwen. Door luchtcirculatie via een luchtmonsteranalysator toe te passen kan snel geconstateerd worden of zich een besmetting heeft voorgedaan. Indien een besmetting is ontstaan zal deze zich binnen de box bevinden waardoor geen kans bestaat op een inwendige besmetting.

Ad 5) Normaliter wordt een koelval slechts afgekoppeld als alle Xe zich in de opslagkoelvalven (Xe-KV-groot en Xe-KV-klein) en als P1 en H1 resp. P4 en H4 gesloten zijn.

5.2.3 Beperking van inwendige besmetting

Door bovenstaande preventieve maatregelen wordt voorkomen dat radioactieve stoffen in het milieu terecht komen (als er geen incidenten optreden) en zal bij eventuele incidenten de besmetting tot een minimum beperkt blijven. Daardoor is voldaan aan de stralingshygiënische eis de inwendige besmetting van het bedienend personeel zo laag mogelijk te houden. Bovendien vinden na afloop van de werkzaamheden in het radioologisch lab schildkliermetingen plaats.

5.2.4 Beperking uitwendige stralingsbelasting

Uit § 5.1 blijkt dat het dosistempo in de omgeving van de opstelling ten gevolge van de aangemaakte radionucliden en de activering van de targethouder hoog is. Tijdens de produktie van ^{123}I ontstaat ter plaatse van de gastargetopstelling ook een hoge neutronenflux door de kernreacties van de protonen in het materiaal dat bestraald wordt. Het neutronen- en gammadosisequivalenttempo, resp. \dot{H}_n en \dot{H}_γ wordt bij een gegeven opstelling bepaald door de bundelstroom en de aangebrachte afscherming.

Om de stralingsbelasting ten gevolge van de neutronen- en gammastraling voor de omgeving te reduceren is er een afscherming rondom de opstelling aangebracht bestaande uit betonblokken: de opstelling staat in een zg. bunker. De afscherming voor de omgeving bestaat uit een ca. 1,5 m dikke betonwand. Het dak van de bunker bestaat uit 0,5 m beton met daar bovenop 0,4 m paraffine. Tevens is er een betonnen schuifdeur, gevuld met paraffine, aangebracht. Het doel van deze deur is tweeledig: in gesloten toestand wordt het stralingsniveau voor de omgeving tijdens de bestraling van de gastargetopstelling gereduceerd, in open toestand wordt het bundelgeleidingssysteem afgeschermd, zodat werken in de bunker mogelijk is terwijl bundeltransport plaats vindt naar andere bestralings-opstellingen in de bundelzaal. De bestralings-bunker (bunker 3) is alleen via een labrynth te bereiken (zie fig. 1.2).

Om na te gaan welk effect deze afschermingsmaatregelen hebben is bij een aantal bestralingen het neutronen- en gammadosisequivalenttempo gemeten op verschillende plaatsen buiten de bunker (tabel 5.9).

Ter verduidelijking is in fig. 1.2 en 1.3 een plattegrond opgenomen van de bestralingsruimte en zijn de meetplaatsen a t.m. s, waar de metingen verricht zijn, aangegeven. De dosisequivalenttempi zijn gemeten tijdens een bestraling met een bundelstroom van 20 μA . Uit deze metingen mag geconclu-

deerd worden dat de getroffen afschermingsmaatregelen voor de omgeving voldoende zijn. Het criterium hiervoor is dat het dosisequivalenttempo op 50 m buiten het cyclotrongebouw

meetplaats	\dot{H}_γ ($\mu\text{SV/h}$)	\dot{H}_n ($\mu\text{SV/h}$)	\dot{H}_{tot} ($\mu\text{SV/h}$)	opmerkingen	
a	2	3	5	Bij een bundelstroom van 30 μA zijn alle dosisequivalenttempi een factor 1,5 hoger.	
b	2	3	5		
c	10	9	19		
d	4	4	8		
e	2	3	5		
f	2	3	5		
g	3	3	6		
h	8	3	11		
i	3	3	6		
j	2	3	5		
k	1	3	4		
l	20				tijdens terugwinnen
m	50				
n	1000				
o	1000				
p	25.000			vlak na terugwinnen	
q	60.000			tijdens terugwinnen	
q	40.000			vlak na terugwinnen	
r	200.000			vlak na uitspoelen	
s	1500			vlak na uitspoelen	

Tabel 5.9 De dosisequivalenttempi \dot{H}_γ en \dot{H}_n op de diverse meetplaatsen, gemeten bij een bundelstroom $I_p=20 \mu\text{A}$ (a-k); op de meetplaatsen l-s is gemeten na afloop van de bestraling ($I_p=0$). Meetplaats r is vlak achter 123-I-koelval-1, meetplaats s is vlak achter een loodmuurtje. De dosisequivalenttempi a-p zijn gemeten op 1 à 1,5 m hoogte, meetplaats q bevindt zich 30 cm boven de targethouder, meetplaats r en s bevinden zich op een hoogte van 0,5 m).

kleiner is dan $30 \mu\text{Sv}/\text{week}$.

Uit andere metingen is gebleken dat het dosisequivalenttempo in bunker 3 ten gevolge van bestralingen van opstellingen in andere bunkers niet ontoelaatbaar verhoogd wordt, dankzij de betonnen schuifdeur.

Om het gammadosisequivalenttempo afkomstig van de opstelling zelf te reduceren is de opstelling omgeven met een 5 cm dikke loodmuur. Ondanks deze loodmuur is het dosisequivalenttempo in de bunker ca. 6 uur na EOB nog hoog ($\dot{H} > 100 \mu\text{Sv}/\text{h}$, zie tabel 5.9). Dit dosistempo ontstaat voornamelijk door de activering van de targethouder.

Bij een bestraling wordt gemiddeld een dosis van ca. 0,2 mSv opgelopen. De collectieve jaardosis (bij 2 bestralingen per week) is dus ca. 20 mSv.

5.2.5 ARAMOS

ARAMOS staat voor Automatisch Registrerend Alarmerend MOnitor Systeem.

Op verschillende plaatsen aan de buitenwand en binnenwand van de bundelzaal zijn γ - en neutronen-detektors geplaatst. Als het dosisequivalenttempo gedurende enige tijd boven een ingestelde waarde komt gaat in de bedieningsruimte een akoestisch alarm.

Op deze wijze wordt gesignaleerd of het dosisequivalenttempo in de bundelzaal binnen de gestelde normen blijft (5 mSv/jaar aan de buitenkant van de bundelzaal en 1,5 mSv/jaar op de openbare weg).

5.3 Storingsanalyse

Ondanks de preventieve veiligheidsmaatregelen (bufferruimte, PLC) kunnen er toch enkele storingen optreden.

In deze paragraaf worden deze storingen besproken, alsmede de handelingen die moeten worden verricht om de storing te verhelpen en/of om verspreiding van radioactiviteit zoveel mogelijk te beperken.

storing 1 : Het folie van de targethouder breekt of lekt tijdens de bestraling.

gevolg : Xe stroomt in de bufferruimte.

rad. gevolg: Er kunnen Cs, Xe en I-isotopen in de bufferruimte komen en neerslaan op de wand.

waarneming : In de bedieningsruimte wordt waargenomen dat de druk in de targethouder vermindert.

handeling : Bestraling stoppen en het xenon uit de targethouder en bufferruimte terugwinnen in de koelvallen.

storing 2 : Het folie op de targethouder en het folie op de bufferruimte breken tijdens de bestraling.

gevolg : Er ontstaat een gasinlek in het BGS. Bij een foliebreuk gaat vacuümklep K1 automatisch dicht, bij een klein lek niet.

rad. gevolg: Het gevormde ^{123}Xe (en mogelijk een gedeelte van de Cs- en I-isotopen) worden in de bundelpijp gezogen en het Xe komt in de olie van de vacuümpomp in bunker 1 terecht. Mogelijk ontsnapt een gedeelte van dit xenon uit de olie en komt in bunker 1 terecht.

waarneming : In de bedieningsruimte wordt waargenomen dat de druk in de targethouder vermindert. Mogelijk valt ook klep K1 dicht.

handeling : Bestraling stoppen en de SBD waarschuwen, het

xenon uit de targethouder, bufferruimte en het BGS terugwinnen in de koelvallen, het BGS controleren op radioactieve besmetting en luchtstofmonsters nemen in de bundelzaal (en eventueel in bunker 1 en bunker 3). Indien zich xenon in de olie van de vacuümpomp bevindt, moet de olie uit de pomp verwijderd worden om het ^{124}Xe gas hieruit terug te winnen.

storing 3 : Het xenon-gas lekt uit de opstelling tijdens de bestraling.

gevolg : De druk in de targethouder neemt af.

rad. gevolg: Een gedeelte van het geproduceerde ^{123}Xe komt in het koelwater of in bunker 3 terecht.

waarneming : In de bedieningsruimte wordt waargenomen dat de druk in de targethouder vermindert.

handeling : Bestraling stoppen en het xenon uit de targethouder en bufferruimte terugwinnen in de koelvallen. Het koelwater op besmetting controleren en de SBD waarschuwen.

storing 4 : De waterkoeling valt uit én de beveiliging m.b.v. het waterslot werkt niet.

gevolg : Het xenon-gas en het stopblok worden heet.

rad. gevolg: geen direct radiologisch gevolg.

waarneming : De druk in de targethouder neemt toe.

handeling : Bestraling stoppen en het koelsysteem controleren en de storing verhelpen. Indien nodig waterpomp en/of leidingen vervangen.

storing 5 : De spoelvloeistof lekt uit het uitspoelsysteem.

gevolg : Er komt spoelvloeistof buiten het uitspoelsysteem in de opvangbak.

rad. gevolg: De opvangbak waarin de flesjes staan, de tafel, de vloer, en/of de persoon die het uitspoelen

uitvoert worden besmet met een gedeelte van de spoelvroelstof.

waarneming : De hoeveelheid spoelvroelstof die in het flesje terugkomt is significant kleiner dan de ingepompte hoeveelheid spoelvroelstof. Eventueel zijn er druppels buiten het uitspoelsysteem waar te nemen.

handeling : Decontamineren of andere maatregelen treffen in overleg met de SBD.

Verder kunnen door uitval van de netspanning of de perslucht storingen optreden bij diverse apparaten (PLC, kleppen, slangenpomp, stappenmotor, schuifdeur).

In geval van het uitvallen van de netspanning kan overgeschakeld worden op een noodstroom-voorziening. De PLC moet dan opnieuw gestart worden en er moet gecontroleerd worden welke kleppen opnieuw geopend moeten worden (bij spanningsuitval worden direct alle kleppen gesloten).

Indien de persluchtvoorziening, na uitval, niet hersteld kan worden, kunnen de kleppen eventueel met de hand bediend worden. In dit geval moeten de kleppen echter kortstondig geopend worden.

LITERATUUR

- BER 84 ^{123}I productie via de (p,2n)- en (p,pn)-reactie op ^{124}Xe . Berkers, P.W.J. en Jonkers, A.G.M., Afstudeerverslag THE (1984)
- BOS 77 A new approach to target chemistry for the iodine-123 production via the $^{124}\text{Te}(p,2n)$ reaction. Bosch, R.L.P. v.d., Goelij, J.J.M. de, Heide, J.A. v.d., Tertoolen, J.F.W., Theelen, H.M.J. and Zegers, C., Int.J.Appl.Radiat.Isot. 28 255 (1977)
- BUR 86 Aanpassingen aan de ^{124}Xe -bestralingsopstelling voor routinematige produktie van ^{123}I op de THE. Burg, R.M.W.J. v.d., Afstudeerverslag THE (1986)
- DOS 84 Dosimetrie bij inwendige besmetting volgens het ICRP-30 model. Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (1984)
- HAA 84 Nucleaire geneeskunde. Haas, G. de, Verdegaal, W.P., Graaf, C.N. de en Garritsen, F.A. (1984)
- HOT 83 Bedienungsanleitung überdruckaufnehmer P 11. Hotting Baldwin Messtechnik, J.L. Bienfait B.V., Aerdenhout
- ICR 79 Limits for Intake of Radionuclides by Workers. ICRP-publicatie 30 (1979)
- ICR 83 Radionuclide transformations: Energy and intensity of emissions. ICRP-publicatie 38 (1983)
- KLE 84 De produktie met het THE-cyclotron van ^{18}F als $^{18}\text{F}-\text{F}_2$ via de $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{F}$ -kernreactie voor toepassingen in de nucleaire geneeskunde. Kleeven, W.J.G.M., Afstudeerverslag THE (1984)

- MIT 85 Handleiding bij de Mitsubishi F-serie vrij programmeerbare besturingen.
- NAC 69 Table of Specific Gamma Ray Constants. Nachtigall, D., Thiemig Taschenbücher, band 34 (1969)
- RAD 70 Radiological Health Handbook (1970)
- REU 83 Gamma Ray Catalogus. Reus, U. and Westmeier, W., At. Data.Nucl.Dat.Tabl. 29 (1983)
- SLA 86 Eigenschappen van folies en foliekoeling in gastargettechnologie. Slangen, J.J.M. Stageverslag THE (1986)
- WEB 84 Inleiding tot de stralingshygiëne. Weber, J. en Rasmussen, C.E. (1984)

APPENDIX A

Op de volgende pagina's is een 'listing' afgedrukt van het programma dat geschreven is voor de PLC. Op pagina A.20 wordt een overzicht gegeven van de gebruikte ingangen, uitgangen, timers, counters en hulpfuncties.

```
----- PLC -----
(000) LD 71 eerste cyclus 1
RST 460 teller resetten
LD 401 Na activeren keuzeschakelaar wordt
PLS 101 bijbehorende hulpfunctie 1 cyclus actief
LD 402 geld voor Plk-P9k, Mlk-M4k, PI, PU, SP
PLS 102
LD 403
PLS 103
LD 404
PLS 104
LD 405
PLS 105
LD 406
PLS 106
LD 407
PLS 107
LD 410
PLS 110
LD 411
PLS 111
LD 412
PLS 112
LD 413
PLS 113
LDI 502 roteren (1=roteren, 0=stilstaan)
OUT 460 teller verhogen bij negatieve flank van roteren
K 10
LD 503
PLS 123
LD 504
PLS 124
LD 506
PLS 126
LD 507
PLS 127
LD 510
PLS 130
LD 511 ASPk aan
PLS 131 puls na keuzeschakelaar aan
LDI 511 ASPk uit
PLS 231 puls na keuzeschakelaar uit
-----
LD 71 eerste cyclus geen kleppen spontaan open
NOP 777 (na 2 maal PLS lxx is lxx gereset)
STATUS ----- status van Alleeg,...,luchtinB bepalen
LD 435 P5b open
AND 437 P7b open
ANI 400 drukB laag
OUT 550
K 1
-----
(050) LD 435 P5b open
AND 531 P9b open
ANI 415 druk2 laag
OUT 555
K 1
```

LD 550
OR 555
OR 300
OUT 300 Alleeg :=1

LD 550
OR 555
OR 301
OUT 301 A2leeg :=1

LD 550
OR 302
OUT 302 Bleeg :=1

LDI 550
ANI 555
AND 305
OUT 305 waterinA1 :=0 als 550 of 555=1

LDI 550
ANI 555
AND 306
OUT 306 waterinA2 :=0 als 550 of 555=1

LD 435 P5b open
ANI 301 A2leeg laag
OUT 177
LDI 177
AND 300
OUT 300 Alleeg :=0

LDI 435 P5b dicht
AND 437 P7b open
ANI 400 drukB laag
OUT 551
K 1

LDI 435 P5b dicht
AND 531 P9b open
ANI 415 druk2 laag
OUT 556
K 1

LD 551
OR 556
OR 301
OUT 301 A2leeg :=1

LD 551
OR 302
OUT 302 Bleeg :=1

LDI 551
ANI 556
AND 306
OUT 306 waterinA2 :=0 als 551 of 556=1

(100)

LD 435 P5 open
ANI 300 A1 niet leeg
LD 437 P7 open
ANI 302 Bleeq
ORB
OUT 177
LDI 177
AND 301
OUT 301 A2leeg :=0

LDI 437 P7b dicht
ANI 400 drukB laag
OUT 552
K 1

LD 552
OR 302
OUT 302 Bleeq :=1

LD 431 P1b open
AND 400 drukB hoog
OR 274
OUT 274

LD 431 P1b open (P1open^niet C1leeg)=niet(P1dicht v C1leeg)
ANI 303 C1 niet leeg
AND 274
OUT 274

LD 431 P1b open
AND 432 P2b open
AND 274
OR 270
OUT 270

LD 431 P1b open
ANI 303 C1 niet leeg
AND 270
OUT 270

LD 431 P1b open
AND 433 P3b open
AND 274
OR 271
OUT 271

LD 431 P1b open
ANI 303 C1 niet leeg
AND 271
OUT 271

LD 431 P1b open
ANI 432 P2b dicht
ANI 433 P3b dicht

(150)

AND 274
AND 270
AND 271
ANI 400 drukB laag
OUT 553
K 1

LD 553
OR 303
OUT 303 C1leeg :=1

LD 553
OR 302
OUT 302 B1leeg :=1

LD 434 P4b open
AND 400 drukB
OR 275
OUT 275

LD 434 P4b open
ANI 304 C4 niet leeg
AND 275

OUT 275
LD 434 P4b open
AND 432 P2b open
AND 275
OR 272
OUT 272

LD 434 P4b open
ANI 304 C4 niet leeg
AND 272
OUT 272

LD 434 P4b open
AND 433 P3b open
AND 275
OR 273
OUT 273

LD 434 P4b open
ANI 304 C4 niet leeg
AND 273
OUT 273

LD 434 P4b open
ANI 432 P2b dicht
ANI 433 P3b dicht
AND 275
AND 272
AND 273
ANI 400 drukB laag
OUT 554
K 1

(200)

```
LD 554
OR 304
OUT 304 C4leeg :=1
-----
LD 554
OR 302
OUT 302 B1leeg :=1
-----
LDI 302 B niet leeg
AND 431 P1b open
OUT 177
LDI 177
AND 303
OUT 303 C1leeg :=0
-----
LDI 302 B niet leeg
AND 434 P4b open
OUT 177
LDI 177
AND 304
OUT 304 C4leeg :=0
-----
LDI 303 C1 niet leeg
AND 431 P1b open
OR 432 P2b open
OR 433 P3b open
LDI 304 C4 niet leeg
AND 434 P4b open
ORB
LDI 301 A2 niet leeg
AND 437 P7b open
ORB
AND 400 drukB hoog
OUT 177
LDI 177
AND 302
OUT 302 B1leeg :=0
-----
LD 530 P8b open
OR 306
OUT 306 waterinA2 :=1
-----
LD 305 waterinA1
AND 435 P5b open
OR 306
OUT 306 waterinA2 :=1
-----
LD 306 waterinA2
AND 435 P5b open
OR 305
OUT 305 waterinA1 :=1
-----
LD 305 waterinA1
OR 306 waterinA2
OUT 310 waterinA
-----
```

```
LD 303 C1leeg
AND 431 P1b open
LD 304 C4leeg
AND 434 P4b open
ORB
LD 301 A2leeg
AND 437 P7b open
ORB
AND 302 B1leeg
AND 400 drukB
OR 307
OUT 307 luchtinB :=1
-----
(250) LDI 400 drukB laag
      OUT 557
      K 1
      LDI 557
      AND 307
      OUT 307 luchtinB :=0 als drukB=0
      -----
HOOFD Begin HOOFDPROGRAMMA
      -----
      LDI 505 Noodstop (niet aanwezig op bedieningspaneel)
      NOP 741 -----
      LDI 70
      OUT 436 P6,P8 en P9 dicht
      OUT 530
      OUT 531
      END 741 <-----
      -----
      LD 231 ASP net uit
      NOP 707 RESET ASP
      -----
      LD 511 ASP aan
      AND 500 niet beveiligd
      OR 513 pauze (niet op bedieningspaneel)
      NOP 777 STATUS TONEN (verder niets bedienen)
      -----
      LD 511 ASP aan
      AND 143
      OUT 143 klaar :=0 als 511 uit
      -----
      LD 131 PLS ASP aan
      OR 175 ASP mag beginnen
      AND 511 ASP aan
      ANI 437 P7 dicht
      ANI 531 P9 dicht
      AND 414 M5 indicatie
      AND 300 Alleeg
      AND 301 A2leeg
      AND 501 perslucht aan
      LDI 534 PI uit
      ANI 535 PU uit
      ORI 502 roteren
      ANB
      OUT 175 ASP mag beginnen of verdergaan
      -----
```


LDI 175 ASP mag niet verdergaan
AND 150 ASP is bezig
NOP 707 RESET ASP
LDI 175 ASP mag niet verdergaan

AUTOSPOELEN

LDI 175 ASP mag niet verdergaan
OR 143 ASP is klaar
NOP 700 AUTOSPOELEN overslaan NORMAAL-BEDRIJF

LD 150 ASP al langer aan
NOP 711 dan geen initialisatie
----- initialisatie -----

(300)

LDI 70
OUT 151 sprongtabel initialiseren
OUT 152
OUT 153
OUT 154
OUT 155
LD 70
OUT 140 eerste spoel-cyclus
OUT 150 eerste handelingen uitvoeren, ASP bezig

END 711 Sprongtabel

LD 151
NOP 701 beluchten
LD 152
NOP 702 inpompen
LD 153
NOP 703 spoelen
LD 154
NOP 704 wachten tot roteren=0
LD 155
NOP 705 uitpompen
----- Eerste handelingen -----

LD 70
OUT 435
OUT 530 P5 en P8 open
LDI 70
OUT 532 M4 dicht
LD 70
OUT 451
K 1.5 beluchten
OUT 151 151 :=1 ; timer 1 bezig
NOP 700

END 701

timer 1 bezig (beluchten)

(350)

LDI 451
NOP 700 als timer nog bezig dan naar 700
LDI 141
OUT 533 M1
LD 141
ANI 142
OUT 430 M2

```
LD 142
ANI 143
OUT 537 M3
LD 70
OUT 532 M4 open
OUT 534 POMP IN aan
OUT 452
K 270 inpompen
OUT 152 152 :=1 ; timer 2 bezig
LDI 70
OUT 151 151 :=0
OUT 451
K 1.5
LD 70
NOP 700
-----
END 702 timer 2 bezig (inpompen)
-----
LDI 452
NOP 700
(350) OUT 534 POMP IN uit
OUT 435 P5 dicht
LD 70
OUT 447 SPOELEN aan
OUT 453
K 900 spoelen
OUT 153 153 :=1 ; timer 3 bezig
LDI 70
OUT 152 152 :=0
OUT 452
K 270
LD 70
NOP 700
-----
END 703 timer 3 bezig (spoelen)
-----
LDI 453
NOP 700 als timer nog bezig dan naar 700
OUT 447 SPOELEN uit
LD 70
OUT 154 154 :=1 ; wachten tot roteren=0
LDI 70
OUT 153 153 :=0
OUT 453
K 900
LD 70
NOP 700
-----
END 704 wachten tot roteren=0
-----
(400) LDI 460 nog niet 10 maal geroteerd
OR 502 nog aan het roteren
NOP 700
LD 70
OUT 435 P5 open
```

```

OUT 535 POMP UIT aan
OUT 455
K 260 uitpompen
OUT 155 155 :=1 ; timer 5 bezig
LDI 70
OUT 154 154 :=0
LD 70
NOP 700
-----
END 705 timer 5 bezig (uitpompen)
-----
LDI 455 als timer nog bezig dan naar 700
NOP 700
OUT 535 POMP UIT uit
OUT 155
OUT 455
K 260 timer resetten
LD 70
OUT 140
(400) LD 142
OUT 143
LD 141
OUT 142
LD 140
OUT 141 Schuifregister shiften
LDI 143 nog niet klaar
NOP 700
OUT 175 ASP niet verder
OUT 530 P8 dicht
OUT 532 M4 dicht
OUT 537 M3 dicht
OUT 141
OUT 142
OUT 150
-----
END 700 Beveiliging
NORMAAL-BEDRIJF
-----
LD 501 perslucht aan
NOP 742 -----
LDI 70
OUT 431 P1-P9 dicht
OUT 432
OUT 433
OUT 434
OUT 435
OUT 436
OUT 437
OUT 530
OUT 531
NOP 717 NIET-PERSLUCHT
END 742 <-----
----- P1 en P4 open
LDI 436 P6b dicht
ANI 437 P7b dicht
```

LDI 436 P6b open
ANI 530 P8b dicht
ANI 531 P9b dicht
ANI 310 geen waterinA
ORB
OUT 144 P1 en P4 mogen open
OR 500 niet beveiligd
AND 101
OR 431
AND 401
OUT 431 P1 open

LD 144
OR 500 niet beveiligd
AND 104
OR 434
AND 404
OUT 434 P4 open

(450)

----- P2 en P3 open
LD 512 zuiveren aan
ORI 302 B niet leeg
ORI 307 geen luchtinB
AND 144 P1 en P4 mogen open
OUT 145 P2 en P3 mogen open
OR 500 niet beveiligd
AND 102
OR 432
AND 402
OUT 432 P2 open

LD 145
OR 500 niet beveiligd
AND 103
OR 433
AND 403
OUT 433 P3 open

----- P5 open
LDI 300 A1 niet leeg
ORI 301 A2 niet leeg
ANI 436 P6b dicht
ANI 530 P8b dicht
ANI 531 P9b dicht
ANI 310 waterinA
AND 437 P7b open
OR 300 Alleeg
ANI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 105
OR 435
LD 405
OR 511
ANB

OUT 435 P5 open
----- P5 dicht
LD 530 P8b open

(500)

OR 531 P9b open
OR 310 waterinA
ANI 300 A1 niet leeg
ANI 500 wel beveiligd
LD 500 niet beveiligd
ORI 511 ASPk uit
ANI 405
ORB
OUT 177
LDI 177
AND 435
OUT 435 P5 dicht
----- P6 open
LDI 431 P1b dicht
OR 303 C1leeg
ANI 432 P2b dicht
ANI 433 P3b dicht
LDI 434 P4b dicht
OR 304 C4leeg
ANB
ANI 512 niet zuiveren
LDI 432 P2b dicht
ORI 433 P3b dicht
ANI 400 drukB laag
AND 512 zuiveren aan
ORB
LD 301 A2leeg
ANI 310 geen waterinA
ANI 530 P8 dicht
ANI 531 P9 dicht
ORI 437 P7 dicht
ANB
AND 302 B1leeg
OR 500 niet beveiligd
AND 106
OR 436
AND 406
OUT 436 P6 open
----- P6 dicht
LD 431 P1b open
ANI 303 C1 niet leeg
OR 432 P2b open
OR 433 P3b open
LD 434 P4b open
ANI 304
ORB
ANI 512 niet zuiveren
LD 432 P2b open
AND 433 P3b open
OR 400 drukB hoog
AND 512 zuiveren aan
ORB
LD 306 waterinA2
ORI 301 A2 niet leeg
OR 530 P8 open

(550)

```
OR 531 P9 open
AND 437 P7b open
ORB
ORI 302 B niet leeg
ANI 500 wel beveiligd
ORI 406
OUT 177
LDI 177
AND 436
OUT 436 P6 dicht
----- P7 open
LDI 436 P6 dicht
ANI 530 P8b dicht
ANI 531 P9b dicht
ANI 310 geen waterinA
ANI 307 geen luchtinB
OR 500 niet beveiligd
AND 107
OR 437
AND 407
ANI 175 ASP niet bezig
OUT 437 P7 open
----- P7 dicht
LD 436 P6b open
ANI 301 A2 niet leeg
OR 530 P8b open
OR 531 P9b open
OR 310 waterinA
ANI 500 wel beveiligd
ORI 407
OR 175 ASP bezig
OUT 177
LDI 177
AND 437
OUT 437 P7 dicht
----- P8 open
LD 300 Alleeg
AND 301 A2leeg
ANI 437 P7b dicht
ANI 531 P9b dicht
ANI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 110
OR 530
LD 410
OR 511
ANB
OUT 530 P8 open
----- P8 dicht
LDI 300 A1 niet leeg
ORI 301 A2 niet leeg
OR 437 P7b open
OR 531 P9b open
ANI 500 wel beveiligd
LD 500 niet beveiligd
```

(600) ORI 511 ASP uit
ANI 410
ORB
OUT 177
LDI 177
AND 530
OUT 530 P8 dicht
----- P9 open
LDI 437 P7b dicht
ANI 530 P8b dicht
AND 301 A2leeg
OR 500 niet beveiligd
AND 111
OR 531
AND 411
ANI 175 ASP niet bezig
OUT 531 P9 open
----- P9 dicht
LD 437 P7b open
OR 530 P8b open
ORI 301 A2 niet leeg
ANI 500 wel beveiligd
ORI 411
OR 175 ASP bezig
OUT 177
LDI 177
AND 531
OUT 531 P8 dicht

END 717
NIET-PERSLUCHT

----- pomp in/uit
LD 533 M1b open
OR 430 M2b open
OR 537 M3b open
ANI 532 M4b dicht
AND 414 M5 indicatie
AND 530 P8b open
AND 435 P5b open
ANI 437 P7b dicht
ANI 531 P9b dicht
OUT 146 pomp mag aan
ANI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 126
OR 534
LD 506 PIk
OR 511
ANB
ANI 535
OUT 534 PI aan

LDI 146 pomp mag niet aan
ANI 500 wel beveiligd
LD 500 niet beveiligd

ORI 511 ASP uit
ANI 506
ORB
OUT 177
LDI 177
AND 534
OUT 534 PI uit

LD 146 pomp mag aan
ANI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 127
OR 535
LD 507
OR 511
ANB
ANI 534
OUT 535 PU aan

(650)

LDI 146 pomp mag niet aan
ANI 500 wel beveiligd
LD 500 niet beveiligd
ORI 511 ASP
ANI 507
ORB
OUT 177
LDI 177
AND 535
OUT 535 PU uit

----- spoelen
LDI 435 P5b dicht
ANI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 130
OR 447
LD 510
OR 511
ANB
OUT 447 spoelen aan

LD 435 P5b open
ANI 500 niet beveiligd
LD 500 niet beveiligd
ORI 511 ASP
ANI 510
ORB
OUT 177
LDI 177
AND 447
OUT 447 spoelen uit

----- M1 - M4
LDI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 112
OR 532

LD 412
OR 511
ANB
OUT 532 M4 open

LD 500 niet beveiligd
ORI 511 ASP uit
ANI 412
OUT 177
LDI 177
AND 532
OUT 532 M4 dicht

LDI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 113
OR 533
LD 413
OR 511
ANB
OUT 533 M1 open

(700)

LD 500 niet beveiligd
ORI 511 ASP uit
ANI 413
OUT 177
LDI 177
AND 533
OUT 533 M1 dicht

LDI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 123
OR 430
LD 503
OR 511
ANB
OUT 430 M2 open

LD 500 niet beveiligd
ORI 511 ASP uit
ANI 503
OUT 177
LDI 177
AND 430
OUT 430 M2 dicht

LDI 511 ASP uit
OR 500 niet beveiligd
AND 124
OR 537
LD 504
OR 511
ANB
OUT 537 M3 open

LD 500 niet beveiligd
ORI 511 ASP uit
ANI 504
OUT 177
LDI 177
AND 537
OUT 537 M3 dicht

LD 70
NOP 777 STATUS TONEN

END 707
RESET ASP

(750)

LDI 70
OUT 530
OUT 447
OUT 141
OUT 142
OUT 143
OUT 150
OUT 151
OUT 152
OUT 153
OUT 154
OUT 155
OUT 175
OUT 176
OUT 451
K 1.5
OUT 452
K 270
OUT 453
K 900
OUT 455
K 260

END 777
STATUS TONEN

einde van programma

LDI 300
OUT 440
LDI 301
OUT 441
LDI 302
OUT 442
LDI 303
OUT 443
LDI 304
OUT 444
LD 310
OUT 445
LD 307
OUT 446

----- checken op verboden keuze-schakelaar

(800) LD 101
ANI 431
LD 102
ANI 432
ORB
LD 103
ANI 433
ORB
LD 104
ANI 434
ORB
LD 105
ANI 435
ORB
LD 106
ANI 436
ORB
LD 107
ANI 437
ORB
LD 110
ANI 530
ORB
LD 111
ANI 531
ORB
LD 112
ANI 532
ORB
LD 113
ANI 533
ORB
LD 123
ANI 430
ORB
LD 124
ANI 537
ORB
LD 126
ANI 534
ORB
LD 127
ANI 535
ORB
LD 130
ANI 447
ORB
LD 131
ANI 175
ORB
PLS 100
LD 100
OUT 536 signalering gedurende 1 cyclus

```
NOP 200 tellertje (heeft verder geen functie)
LD 71
RST 560
LDI 200
OUT 200
OUT 560
K 999
LDI 200
OUT 200
OUT 560
K 999
LD 560
RST 560
OUT 560
K 999
```

END

ingangen	uitgangen	hulpfuncties	hulpfuncties
400 drukB			
401 Plkeuze	431 Plbediening	101 * PLS aan	144 * P1/P4 mogen open
402 P2k	432 P2b	102 * PLS aan	145 * P2/P3 mogen open
403 P3k	433 P3b	103 * PLS aan	
404 P4k	434 P4b	104 * PLS aan	
405 P5k	435 P5b	105 * PLS aan	
406 P6k	436 P6b	106 * PLS aan	
407 P7k	437 P7b	107 * PLS aan	
410 P8k	530 P8b	110 * PLS aan	
411 P9k	531 P9b	111 * PLS aan	
412 M4k	532 M4b	112 * PLS aan	
413 M1k	533 M1b	113 * PLS aan	
414 M5indicatie			
415 druk 2			
500 niet beveiligd			
501 perslucht			
502 roteren (l=roteren)		122 * PLS aan	
503 M2k	430 M2b	123 * PLS aan	
504 M3k	537 M3b	124 * PLS aan	
505 RESET			
506 PompInk	534 PIb	126 * PLS aan	146 * pomp mag aan
507 PompUitk	535 PUb	127 * PLS aan	
510 SPoelenk	536 SPb	130 * PLS aan	
511 ASP		131 * PLS aan	231 * PLS uit
512 zuiveren			150 * ASP-init klaar
513 pauze (niet op bedieningspaneel)			
timers		counters	
451 kl.5 beluchten		460 kl0 roteren-flank	
452 k270 water inpompen			
453 k900 spoelen			
455 k260 uitpompen			
550-556 kl			
overige hulpfuncties			
300/440 Alleeg			
301/441 A2leeg			
302/442 Bleeg			
303/443 C1leeg	270 * P1^P2	271 * P1^P3	274 P1^druk
304/444 C4leeg	272 * P4^P2	273 * P4^P3	275 P4^druk
305 WaterinA1			
306 WaterinA2			
307/446 LuchtinB			
310/445 WaterinA			
70 '1' tijdens RUN			
71 '1' tijdens eerste cyclus			
140-143 schuifregister voor ASP			
151-155 timers	451-455 bezig bij ASP		
175 ASP mag verdergaan			
176 fout in roteren of M5 dicht bij ASP			
177 inverteerhulp			

ERRATA EN AANVULLINGEN BIJ HET VEILIGHEIDSRAPPORT

pag.	oude tekst	nieuwe tekst
1.4 + 5.14	meetplaatsen	meetpunten
3.1 - 3.3	targetbuis	targethouder
4.15	tussenvoegen na '(<u>±</u> 1.30 uur)':	en om de verblijftijd in de bunker (uit oogpunt van stralingshygiëne tot een minimum te beperken
4.16	en het is	en is het
5.11	4,7 kBq	0,23 Bq
5.11	toevoegen na 'in de patiënt.':	Bovendien blijft dit ^{123}mTc in het restant van de ^{123}I - bulk-activiteit als radio- actief afval op de THE achter.
5.11	'goed te reinigen wand oppervlaktebesmetting.'	goed te reinigen voorzetwand worden aangebracht, die ook de leidingen en snoeren gro- tendeels wegwerkt.
5.11	risicoklasse	ruimterisicoklasse
5.12	radiologische besmetting	radioactieve besmetting
5.13	luchtmonsteranalysator	luchtstofbemonsterings-appa- raat (SNUFFY)
5.16	een dosis van ca. 0,2 mSv	een collectieve dosis van ca. 0,2 mSv
5.16	toevoegen na 'akoestisch alarm':	In gebouw Athene worden de

gemeten waarden van de verschillende detektors regelmatig (ca. 1 maal per kwartier) uitgeprint.

5.17 Storing 1/handeling:

Bestraling stoppen. SBD waarschuwen. Het xenon uit de targethouder en bufferruimte terugwinnen in de koelvallen. Rekening houdend met de ^{123}Cs en ^{123}I -besmetting in de bufferruimte en targethouder een nieuw folie plaatsen.

5.18 Storing 2/handeling, toevoegen:

Nieuw folie plaatsen, rekening houdend met de ^{123}Cs en ^{123}I -besmetting.

5.18 Storing 5/rad.gevolg:

De opvangbak waarin de flesjes staan wordt besmet met een gedeelte van de spoolvloeistof.

5.19 Aan eind toevoegen:

Het is duidelijk dat ten aanzien van de storingsen 1 t.m. 5 nadere afspraken gemaakt moeten worden t.a.v.:

- 1) De te volgen procedure: de bestraling continueren of afbreken (in het laatste geval eventueel ^{123}I bestellen in Karlsruhe).
- 2) Extremiteten-dosimetrie.
- 3) Hulpmiddelen, benodigd bij het verhelpen van storingsen.
- 4) Eventueel een complete bufferruimte of targethouder vervangen.
- 5) Alternatieve bestralingsopstelling op een andere meetplaats (teneinde groot onderhoud of vervanging mogelijk te maken).

Appendix B

Berekening van de ABI van ^{123}Cs ($T_{1/2} = 6 \text{ min.}$)

$$H_{50, E} = \sum_r W_r H_{50, r} \quad T = \text{target orgaan}$$

$$H_{50, r} = \frac{E}{S} 1,6 \cdot 10^{-10} U_s \sum_l SEE(T \leftarrow S)_l; \quad S = \text{source}, l = \text{stralingssoort}$$

$$SEE(T \leftarrow S)_l = \sum_\gamma Y_\gamma E_\gamma \frac{AF(T \leftarrow S)_\gamma}{M_T} + Y_\beta \bar{E}_\beta \frac{AF(T \leftarrow T)}{M_T}$$

$U_s =$ aantal desintegraties per Bq intake

INHALATIE

^{123}Cs valt in inhalatieklasse D

Voor de verschillende longcompartimenten a-j kan U_s berekend worden:

a) $\int_0^\infty e^{-\left(\frac{\ln 2}{364} + \frac{\ln 2}{360}\right)t} dt \times 0,3 \times 0,5 = 55 \text{ desintegraties/Bq}$
↓ 100 dag ↓ 6 min.

b) idem = 55

c) $\int_0^\infty e^{-\left(\frac{\ln 2}{364} + \frac{\ln 2}{360}\right)t} dt \times 0,08 \times 0,95 = 28$

d) $\int_0^\infty e^{-(-\ln 2/360)t} dt \times 0,08 \times 0,05 = 2$

e) $\int_0^\infty e^{-(-\ln 2/360)t} dt \times 0,25 \times 0,8 = 104$

f) -

g) -

h) $\int_0^\infty e^{-(-\ln 2/360)t} dt \times 0,25 \times 0,2 = 26$

i) -

j) -

Totaal $U_s = 270 \text{ desint/Bq.}$

Een gedeelte van de activiteit gaat van compartimenten a, b en c naar het transfercompartiment (TC) en naar het maagdarmlkanaal (GI).

uit a) naar TC : $\int_0^{\infty} (1 - e^{-\frac{\ln 2}{264} t}) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{360} t} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{21600} t} dt \approx 0,3 \times 0,5 = 23$
 c) $\approx 0,08 \times 0,95 = 11$

uit b) naar GI : $\int_0^{\infty} (1 - e^{-\frac{\ln 2}{864} t}) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{360} t} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{21600} t} dt \approx 0,3 \times 0,5 = 19 \text{ des/Bq}$
 totaal 34 desint/Bq.

d) en j) verwaarloosbaar vanwege lange biologische halveringstijd in long

$\frac{AF}{M_T}$ voor diverse T ← S combinaties

Source = long	$\frac{AF}{M_T} (E_{\gamma} = 97 \text{ keV})$	$\frac{AF}{M_T} (E_{\gamma} = 511, 596 \text{ keV})$	W_T
T = long	$5,05 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-5}$	0,12
maagwand	$7,19 \cdot 10^{-6}$	$6,32 \cdot 10^{-6}$	0,06
lever	$9,52 \cdot 10^{-6}$	$8,18 \cdot 10^{-6}$	0,06
pancreas	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$9,63 \cdot 10^{-6}$	0,06
milt	$3,05 \cdot 10^{-6}$	$7,31 \cdot 10^{-6}$	0,06
thymus	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,06
skelet	$6,56 \cdot 10^{-6}$	<10%	0,03
rode merg	$8,36 \cdot 10^{-6}$	"	0,12

Source = maaginhoud	$\frac{AF}{M_T} (E_{\gamma} = 97 \text{ keV})$	$\frac{AF}{M_T} (E_{\gamma} = 511, 596 \text{ keV})$	W_T
T = maagwand	$1,73 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$	0,06
pancreas	$6,02 \cdot 10^{-5}$	$7,10 \cdot 10^{-5}$	0,06
milt	$3,26 \cdot 10^{-5}$	$3,26 \cdot 10^{-5}$	0,06
rest	<10%	<10%	

Berekening ALI_{inh}al.

Eqv. γ -straling : $H_{50,E} = (\sum_T W_T SEE(T=long)) \times U_{long} \times 1,6 \cdot 10^{-10}$
 $= \sum_T \{ 0,13 \times 0,097 \cdot \frac{AF}{M_T} + (1,5 \times 0,511 + 0,074 \times 0,596) \cdot \frac{AF}{M_T} \} \cdot W_T \times 270 \times 1,6 \cdot 10^{-10}$
 $= 3,1 \cdot 10^{-13} \text{ Sv/Bq}$

T. g. v. β^+ -straling $\bar{E}_{\beta^+} = 0,33 E_{max} (1 + \frac{E_{max}}{4})^{1/2}$, $E_{max} = 2,99 \rightarrow \bar{E}_{\beta^+} = 1,41 \text{ MeV}$
 $Y_{\beta^+} = 0,75$
 $AF/M_T = \frac{1}{1000}$

$\rightarrow (H_{so, e})_{\beta^+} = 5,45 \cdot 10^{-12} \text{ Sv/Bq}$

ALI (stoch) = $0,05 / (5,45 \cdot 10^{-12} + 3,1 \cdot 10^{-13}) = 8,7 \cdot 10^9 \text{ Bq}$

kleine correctie voor Cs dat in het bloed terecht komt \rightarrow

ALI stoch $\approx 8 \cdot 10^9 \text{ Bq}$

ALI n.s = 10^{10} Bq (maag) \rightarrow niet bepalend.

\rightarrow ALI inh (^{123}Cs) $\approx 8 \cdot 10^9 \text{ Bq}$

ALI ingestie

$f_1 = 1$ (rechtstreeks van maag \rightarrow TC (= bloed))
 gemiddelde verblijftijd $\bar{T} = 6$ uur

U maaginhoud = $\int_0^{\infty} e^{-(\frac{\ln 2}{360} + \frac{\ln 2}{360})t} dt = 472 \text{ desint/Bq}$

U T.C. = $\int_0^{\infty} (1 - e^{-\frac{\ln 2}{2600}t}) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{21600}t} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{360}t} dt = 46 \text{ desint/Bq}$

$f_2 = \sum_T W_T SEE(T \leftarrow \text{maaginhoud}) = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ MeV/desint}$
 $\rightarrow (H_{so, e})_{\beta^+} = 3,2 \cdot 10^{-13} \text{ Sv/Bq}$

β^+ : $AF = 0,5$, $M_T = 150 \text{ g}$ (maagwand) $\rightarrow (H_{so, e})_{\beta^+} = 1,6 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$

ALI stoch = $\frac{0,05}{(9,8 \cdot 10^{-13} + 1,6 \cdot 10^{-11})} = 3 \cdot 10^9 \text{ Bq}$

ALI n.s (maagwand) = $\frac{0,5}{(9,8 \cdot 10^{-13} + 1,6 \cdot 10^{-11})/0,06} = 2 \cdot 10^9 \rightarrow$ bepalend

\rightarrow ALI ingestie = $2 \cdot 10^9 \text{ Bq}$ (maagwand bepalend)