

TEUVO LAAKSONEN

TEHOREAKTORIN INSTRUMENTOINTI

1982-03-04

SEURAAVASSA KALVOSARJASSA LUODaan KATSAUS KEVYT-
VESIREAKTOREIDEN INSTRUMENTOINTIIN. AIHEEN
TARKASTELU ALOITETAAN YDINVOIMALAITOKSEN KOKO
AUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN NÄKÖKULMASTA, MUTTA YKSI-
TYISKOHTAISEMPI TARKASTELU SUORITETAAN VAIN
PAINEVESIREAKTOREIDEN REAKTORIN ULKOPUOLISTEN
NEUTRONIVUOMITTAUSTEN JÄRJESTELMÄLLE JA SEKÄ PWR:N
ETTÄ BWR:N IN-CORE INSTRUMENTOINTIJÄRJESTELMILLE.

ESITELMÄN LOPUKSI LUODaan LYHYT KATSAUS MUIDEN
REAKTORITYYPPIEN IN-CORE INSTRUMENTOINTIJÄRJES-
TELMIIN.

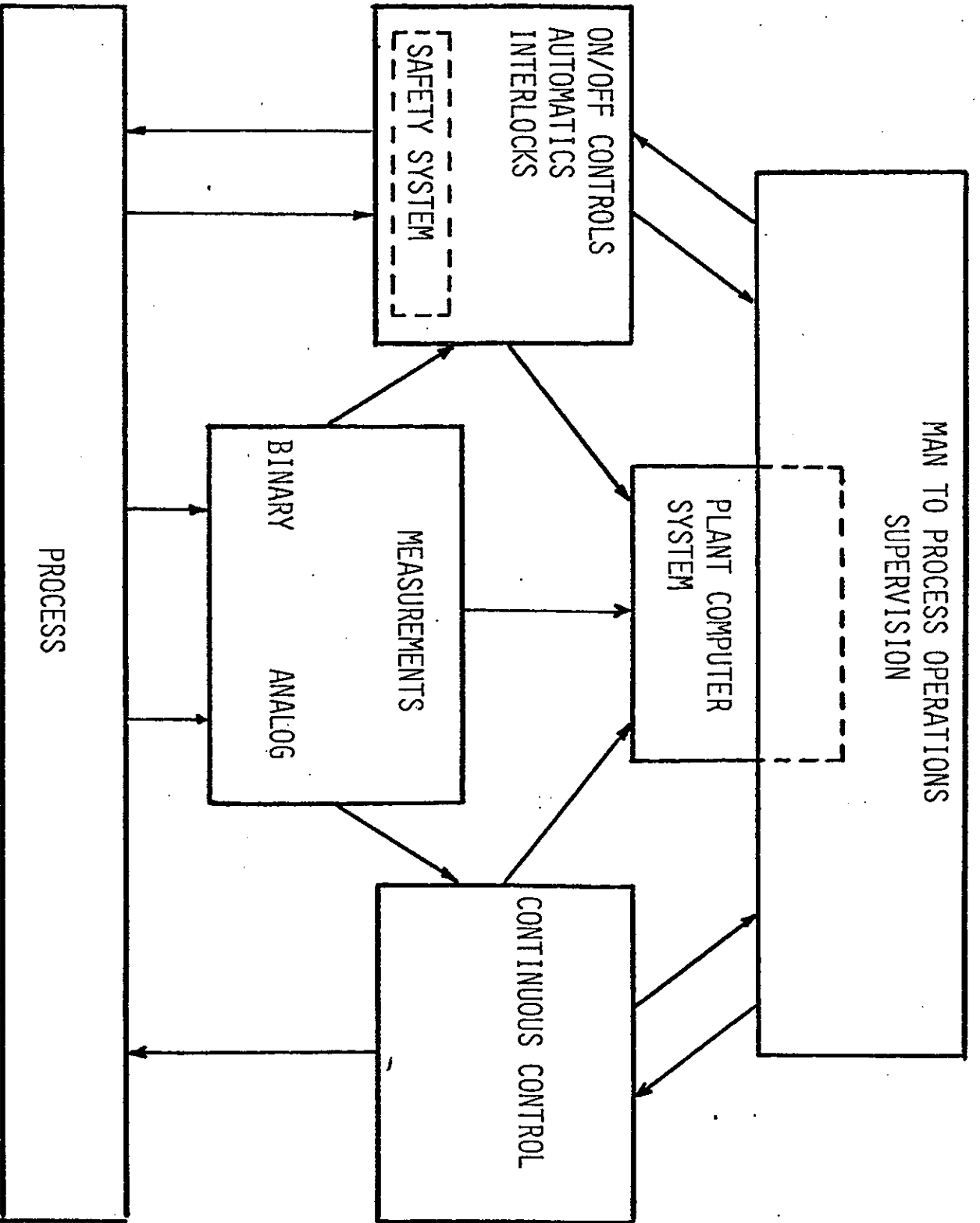


FIG. 1. FUNCTIONAL DIVISION OF THE POWER PLANT AUTOMATION

TEHOREAKTORIN INSTRUMENTOINTI

- YDINVOIMALAITOSAUTOMAATION RAKENNE
- REAKTORIIN LIITTYVÄT INSTRUMENTOINTIJÄRJESTELMÄT
- REAKTORIN ULKOPUOLISET NEUTRONIVUOMITTAUKSET
- IN-CORE INSTRUMENTOINTI
 - PWR
 - LOVIISA ESIMERKKINÄ
 - BWR
 - MUUT REAKTORITYYPIT

REAKTORI-INSTRUMENTOINTI ON OSA YDINVOIMALAITOKSEN
AUTOMAATIOJÄRJESTELMÄÄ (INSTRUMENTOINTIJÄRJESTELMÄÄ)

MYÖS REAKTORI-INSTRUMENTOINTI VOIDAAN JAKAA:

- MITTAUKSIIN (ANALOGIA- JA BINÄÄRI-)
- SÄÄTÖIHIN
- OHJAUKSIIN
- AUTOMATIIKKOIHIN (SUOJAUSJÄRJESTELMÄT)
- LUKITUKSIIN

PWR

BWR

REAKTORIIN LÄHEISESTI LIITTYVÄT INSTRUMENTOINTIJÄRJESTELMÄT

-	REAKTORISUOJAUS	-	REAKTORISUOJAUS
-	REAKTORIPIKASULKU	-	REAKTORIPIKASULKU
-	MUUT SUOJAUSAUTOMATIIKAT	-	MUUT SUOJAUSAUTOMATIIKAT
-	ENGINEERED SAFETY SYSTEMS	-	ENGINEERED SAFETY SYSTEMS
-	SÄÄDÖT JA OHJAUKSET	-	SÄÄDÖT JA OHJAUKSET
-	TEHON SÄÄTÖ	-	TEHON SÄÄTÖ
--	SÄÄTÖSAUVAT	--	KIERTOVEDISÄÄTÖ
--	BOORI	--	SÄÄTÖSAUVOJEN OHJAUS
-	PAINEN SÄÄTÖ	-	SÄÄTÖSAUVALUKITUKSET
-	REAKTORIN ULKOPUOLISET NEUTRONIVUOMITTAUKSET	-	POLTTOAINEENLATAUKSESSA
-	IN-CORE INSTRUMENTOINTI	-	IN-CORE INSTRUMENTOINTI
-	MUUT VALVONTAMITTAUKSET	-	MUUT VALVONTAMITTAUKSET

REAKTORIN ULKOPUOLISET NEUTRONIVUOMITTAUKSET

- SUOJAUKSEEN, VALVONTAAN JA SÄÄTÖÖN (EROTUSVAHVISTIMET)
- MITTAUSALUE ~ 11 DEKADIA
 - LÄHDEALUE (6 DEKADIA, 2 - 4 KANAVAA)
 - VÄLIALUE (8 DEKADIA, 2 - 4 KANAVAA)
 - TEHOALUE (> 2 DEKADIA, 4 - 6 KANAVAA)
- LÄHDEALUEKANAVA
 - FISSIOKAMMIO TAI VERRANNOLLISUUSLASKURI
 - KORKEAJÄNNITELÄHDE
 - VAHVISTIMET JA DISKRIMINAATTORI
 - LOG (COUNT RATE) JA PERIODI
 - SUOJAUS, INDIKOINTI, PIIRTO, TIETOKONE
- VÄLIALUEKANAVA
 - KOMPENSOITU IONISAATIOKAMMIO (BOORI)
TAI FISSIOKAMMIO (?)
 - (KAKSOIS)KORKEAJÄNNITE
 - KESKIARVOSIGNAALI TAI CAMPBELLIN TEKNIikka
 - (ϕ), $\text{LOG } \phi$ JA PERIODI
 - SUOJAUS, INDIKOINTI, PIIRTO, TIETOKONE
- TEHOALUEKANAVA
 - KOMPENSOITU TAI KOMPENSOIMATON IONISAATIOKAMMIO
(BOORI)
 - (KAKSOIS)KORKEAJÄNNITELÄHDE
 - LINEARIKANAVA, ϕ
 - SUOJAUS, SÄÄTÖ, INDIKOINTI, PIIRTO, TIETOKONE

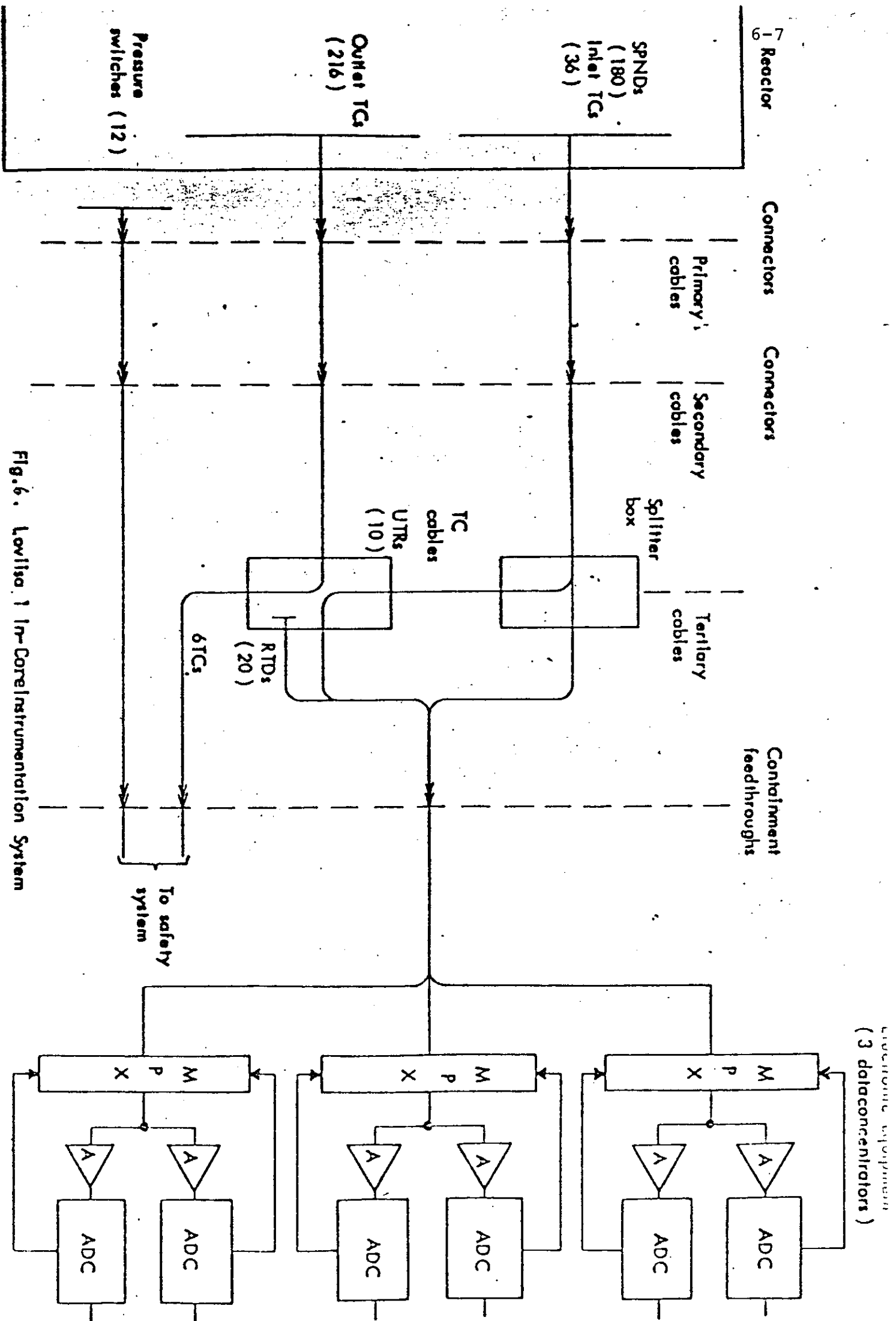


Fig. 6. Loviisa 1 In-Core Instrumentation System

Electronic equipment
(3 data concentrators)

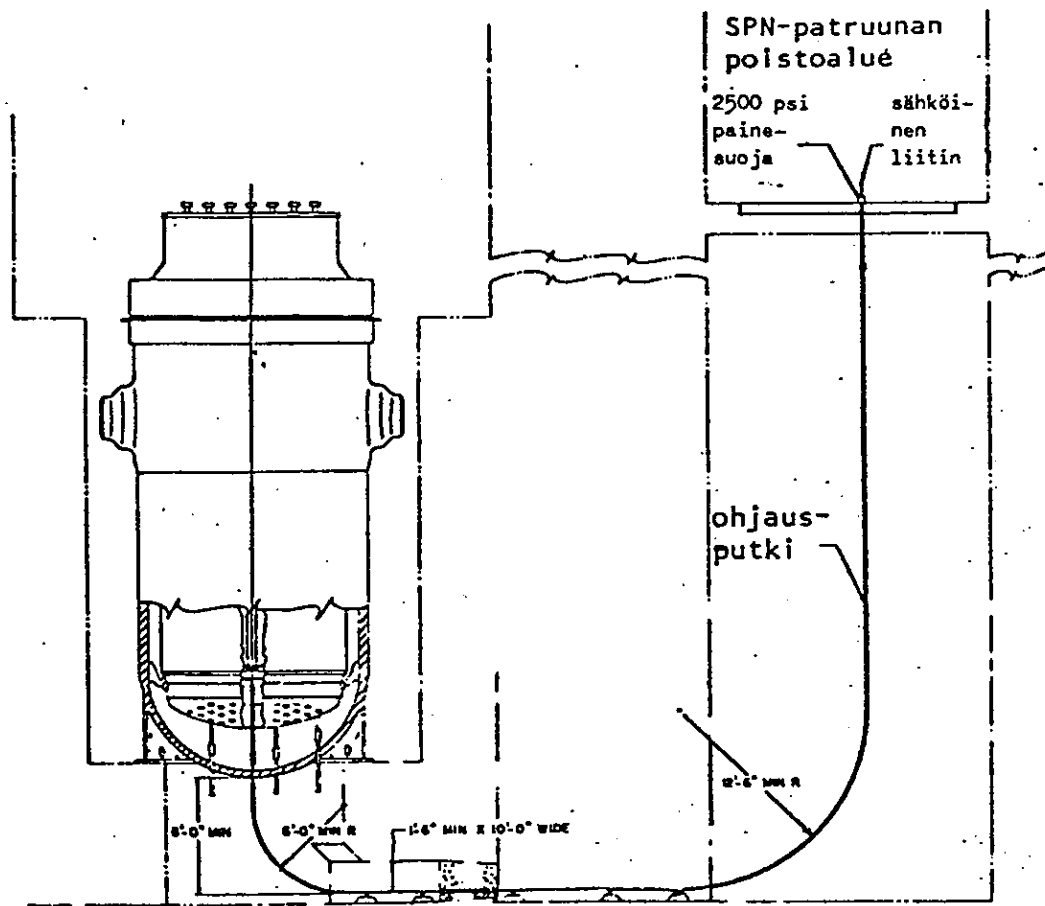
IN-CORE INSTRUMENTOINTI

PWR

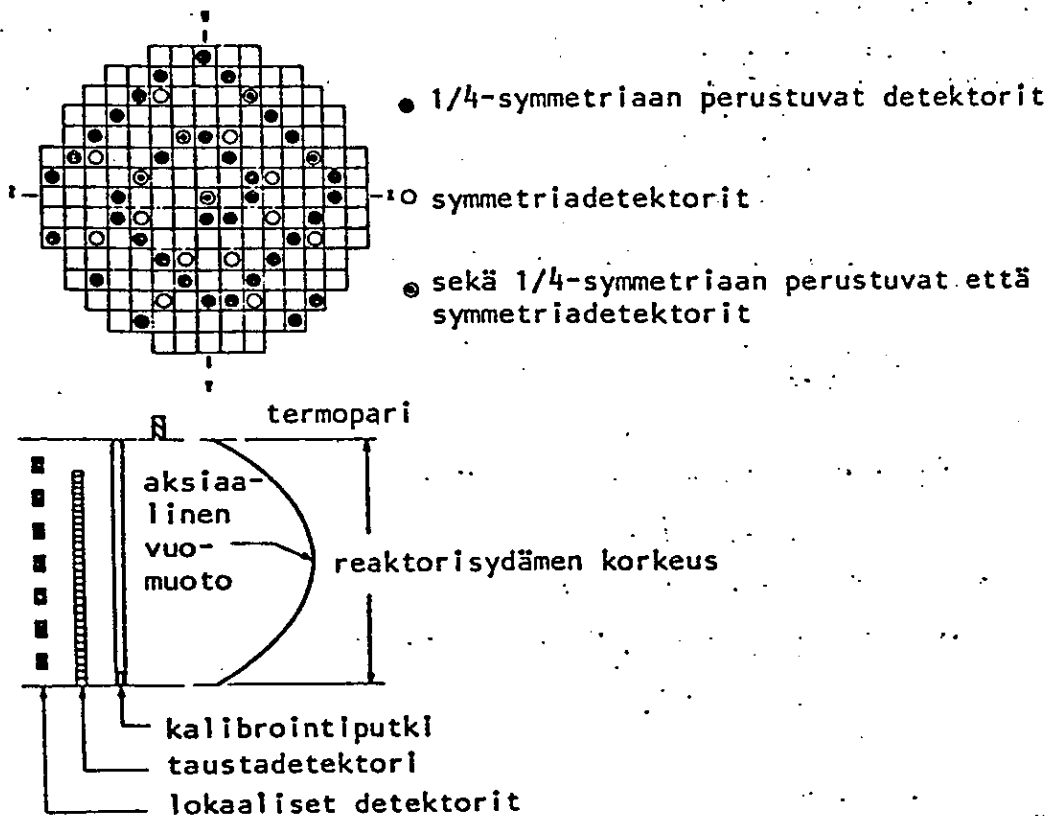
- NEUTRONIVUOMITTAUKSET
 - ERILAISIA JÄRJESTELMIÄ
- LÄMPÖTILAMITTAUKSET
 - TERMOPARIT

BWR

- NEUTRONIVUOMITTAUKSET
 - PIENOISFISSIOKAMMIOT
- EI LÄMPÖTILAMITTAUKSIA



Kuva 4 Painevesireaktorin SPN-detektoripatruunakanava.



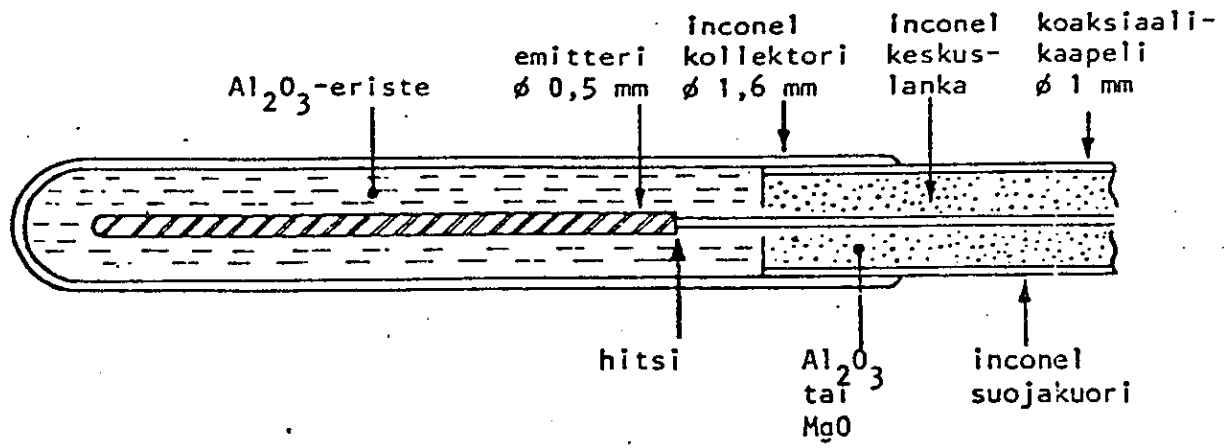
Kuva 5 SPN-detektorien sijoitus painevesireaktorin sydämeen.

PWR:N IN-CORE INSTRUMENTOINTI

- PÄÄKÄYTTÖ: TIETOKONE LASKEE:
 - REAKTORIN TOIMINTAPARAMETREJÄ
 - SYDÄMEN TEHOJAKAUTUMAA
 - POLTTOAINEEN KUORMITUSTA
 - POLTTOAINEEN JÄÄHDYTYSPARAMETREJÄ
 - XENON JAKAUTUMAA

- ANTURISONDIEN SIJOITUS
 - OLETETAAN TIETTY SYMMETRIA JA "JOKAINEN POLTTOAINE-ELEMENTTI" INSTRUMENTOIDAAN. LISÄKSI MUUTAMA MITTAUSKANAVA SYMMETRIAPOIKKEAMIEN HAVAITSEMISEKSI

 - LÄNSIMAISSA REAKTOREISSA 90° , VVER-440 30° SYMMETRIA



KUVA 2. SPN-DETEKTORI

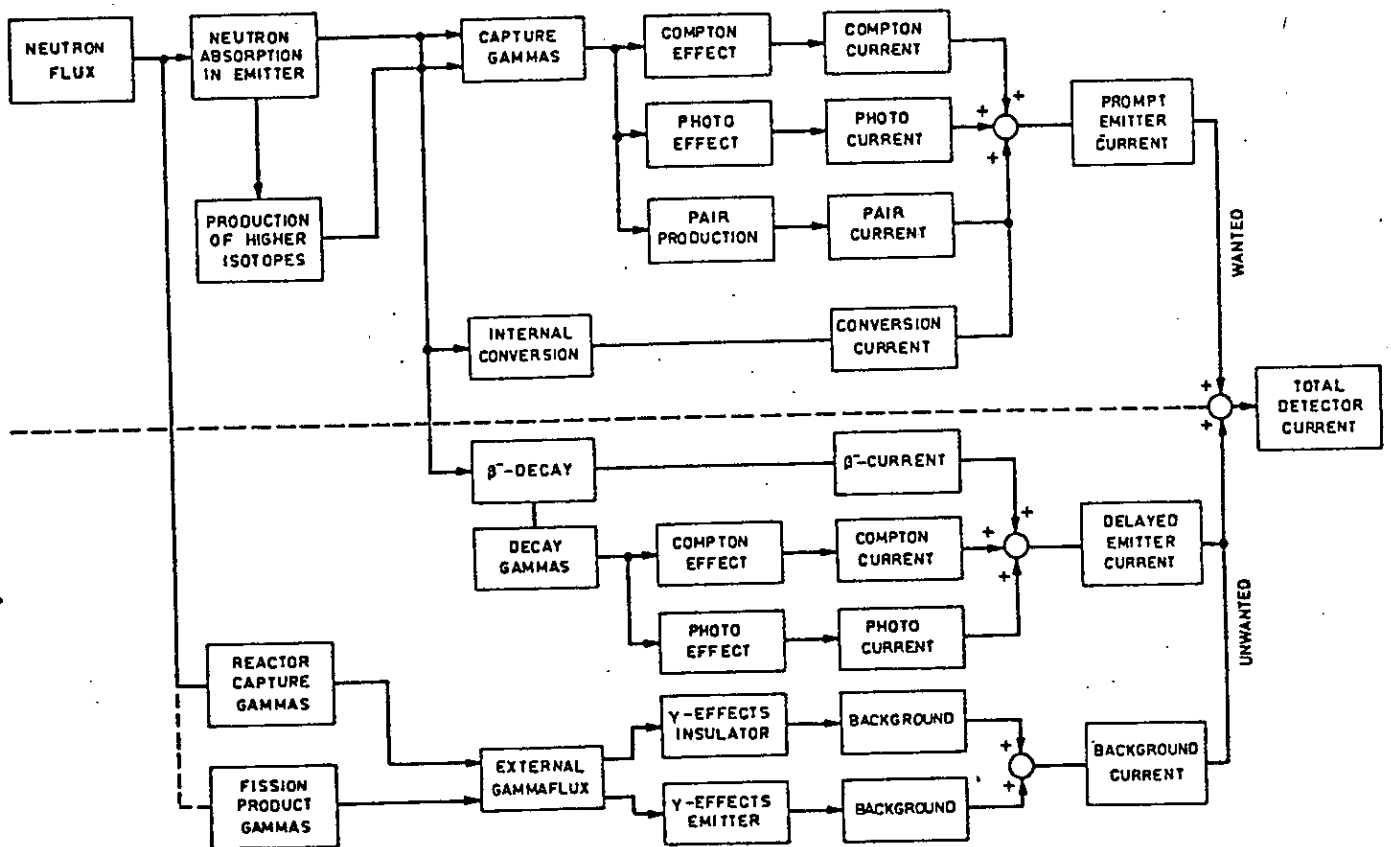


FIG. 3 Schematic diagram for the self-powered neutron detector current computation [87].

PWR:N IN-CORE MITTAUKSET

- LIIKUTELTAVAT IONISAATIOKAMMIOT
 - WESTINGHOUSE, FRAMATOM

- AKTIVOINTIDETEKTORIT
 - SIEMENS: TEHOJAKAUTUMA, KOBOLTTI-SPN-DETEKTORIEN KALIBROINTI
 - TERÄSKUULIA, $D = 1,6 \text{ mm}$, $1,5 \% V^{51}$
 - AKTIIVISUUSMITTAUKSET TIETOKONEELLE

- "KIINTEÄSTI ASENNETUT" SPN-DETEKTORIT
 - COMBUSTION ENGINEERING, BABCOCK & WILCOX (ALTA SISÄÄN)
 - SIEMENS JA VVER-REAKTORIT (PÄÄLTÄ SISÄÄN)
 - DETEKTORISONDISSA 5-8 DETEKTORIA, JOISTA 4-5 LYHYTTÄ RH- TAI CO-DETEKTORIA JA 1 SYDÄMEN PITUINEN V-DETEKTORI. SAATTAO OLLA TAUSTAKAAPELI JA 1-2 TERMOPARIA.
 - DETEKTORIEN LUKUMÄÄRÄ JOPA USEITA SATOJA
ESIM. LOVIISA 180 (36 SONDIA) B&W 416 (52 SONDIA)

- TERMOPARIT
 - CR/AL, MAADOITETTU KUUMALIITOS
 - SAATTAVAT OLLA SPND SONDEISSA (ES. LOVIISA-INLET, CE, BRW) TAI REAKTORIKANNEN LÄPI TUODUISSA TASKUISSA (ES. LOVIISA-OUTLET JA WESTINGHOUSE)

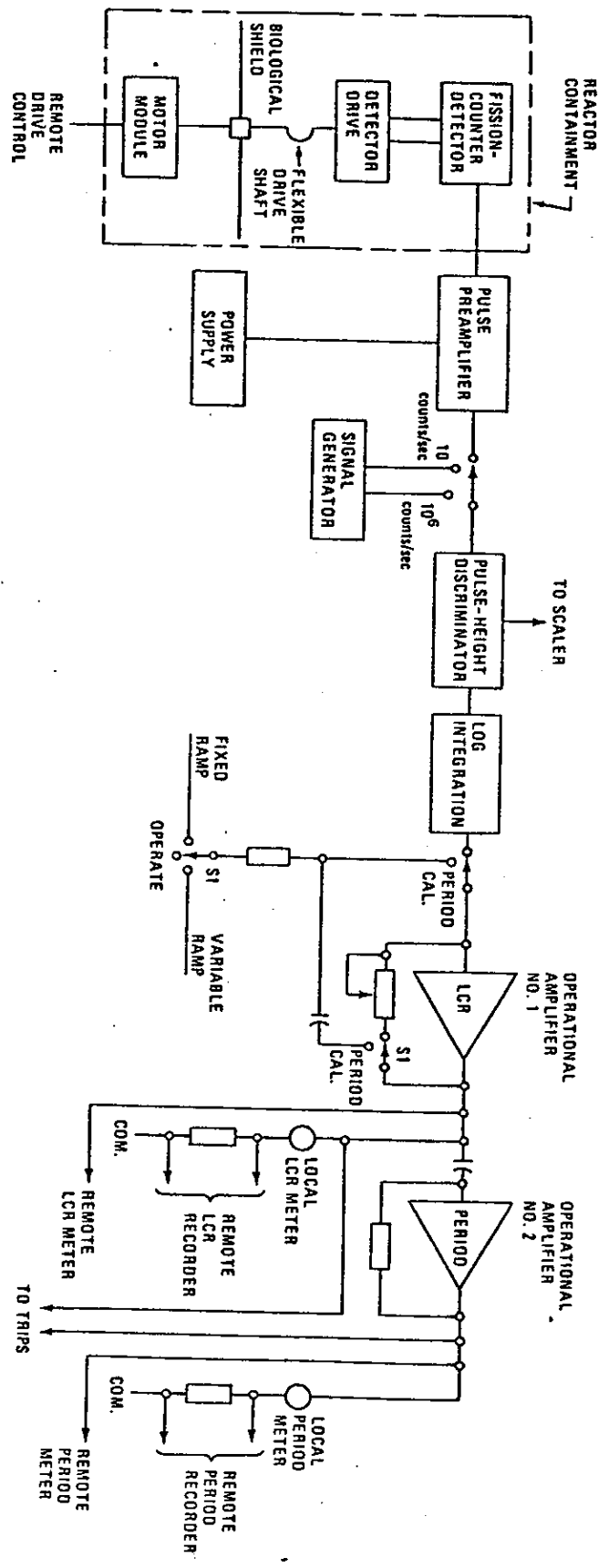
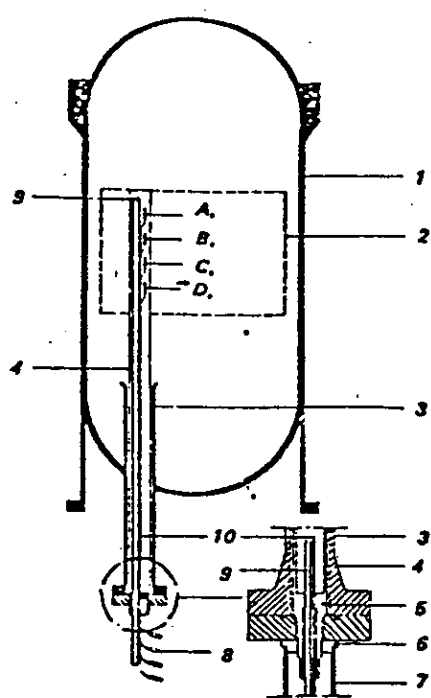


Fig. 3 Functional block diagram of source-range-monitoring-subsystem channel.

BWR:N IN-CORE MITTAUKSET

- AINOASTAAN NEUTRONIVUOMITTAUKSIA (EI LÄMPÖTILAA)
- KÄYTTÖ: SUOJAUKSEEN, VALVONTAAN, LASKENTAAN
- PIENOISFISSIOKAMMIOITA (REGENERATIIVISIA ELI "BREEDEREITÄ")
- MITTAUSALUE YLI 10 DEKADIA
 - LÄHDEALUE $2 \times 10^3 - 2 \times 10^9$ N/CM²S
 - VÄLIALUE $1 \times 10^8 - 1 \times 10^{13}$ N/CM²S
 - TEHOALUE $1 \times 10^{12} - 3 \times 10^{14}$ N/CM²S
- Ö ALAJÄRJESTELMÄÄ
 - SRMS (SOURCE RANGE MONITORING SUBSYSTEM)
 - IRMS (INTERMEDIATE RANGE MONITORING SUBSYSTEM)
 - LPRMS (LOCAL POWER RANGE MONITORING SUBSYSTEM)
 - APRMS (AVERAGE POWER RANGE MONITORING SUBSYSTEM)
 - RBMS (ROD BLOCK MONITORING SUBSYSTEM)
 - TIPS (TRAVERSING IN-CORE PROBE SUBSYSTEM)
- APRMS JA RBMS KÄYTTÄVÄT LPRMS ANTURISIGNAALEJA
- VAIN LPRMS -DETEKTORIT "KIINTEÄSTI ASENETTUJA"



- 1 Reaktoripaineastia 6-15
 2 Reaktorisydän
 3 Johdinputki
 4 Suojaputki
 5 Tiiviste
 6 Kiristysmutteri
 7 Kaapeliliittimen suojaputki
 8 Kaapeliliitin
 9 Paineenkestävä putki liikuttavia detektoreja varten
 10 Detektorikaapeli
- A, B, C, D pienoisfissiokammioita

Kuva 7. Kiehumisvesireaktorin mittauskanava ja tehoalueen pienoisionisaatiokammioiden sijoitus.

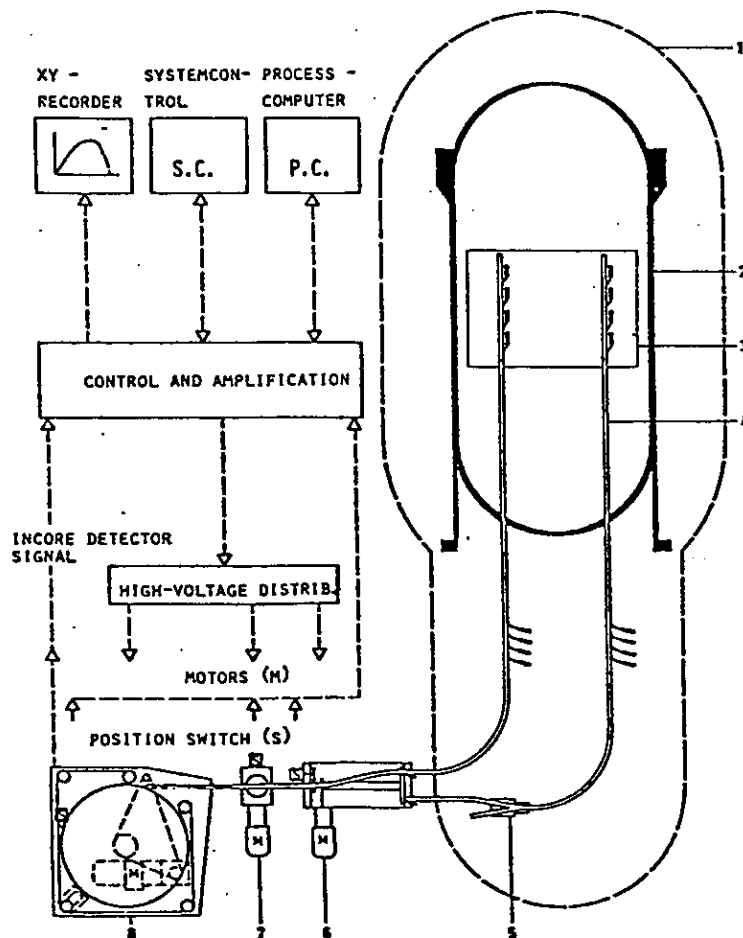


FIG. 8. The travelling incore probe (TIP) system of a boiling water reactor.
 1 - Reactor containment; 2 - reactor pressure vessel; 3 - core; 4 - detector lance; 5 - switch for the selection of different lances; 6 - selection unit; 7 - shear valve; 8 - travelling incore detector drive motor.

BWR: IN-CORE OSAJÄRJESTELMÄT (GE 1100 MWE)

- SRMS
 - 4 KANAVAA
 - COUNT RATE, LOG JA PERIODI
 - SÄÄTÖSAUVALUKITUS, INDIKOINTI, PIIRTO, TIETOKONE
- IRMS
 - 8 KANAVAA
 - CAMPBELLIN MENETELMÄ
 - SUOJAUS, SÄÄTÖSAUVALUKITUS, INDIKOINTI, PIIRTO, TIETOKONE
- LPRMS
 - 172 DETEKTORIA, 43 SONDIA
 - KALIBROINTIPUTKI SONDISSA
 - INDIKOINTI, TIETOKONE, APRMS, RBMS
- APRMS
 - 6 KANAVAA, \leq 24 LPRM:N KESKIARVO KUSSAKIN
 - SUOJAUS, SÄÄTÖSAUVALUKITUS, INDIKOINTI, TIETOKONE
- RBMS
 - 2 KANAVAA, \leq 8 LPRM:N SIGNAALIA KUMMASSAKIN
 - INDIKAATIO PAIKALLISEN TEHON JA APRM-TEHON EROSTA, KUN SÄÄTÖSAUVAA LIIKUTETAAN. (TIETOKONEELLEKIN)
 - TARKOITUS VÄLTÄÄ SÄÄTÖSAUVAN VETOVIRHEIDEN AIHEUTTAMAT PAIKALLISET POLTTOAINEVAURIOIT
- TIPS
 - 5 DETEKTORIA, KUKIN VOIDAAN VIEDÄ 10: EEN LPRM-SONDIIN, JOISTA 1: EEN JOKAINEN
 - LPRM: IEN KALIBROINTIIN
 - X-Y -PIIRTURI, TIETOKONE

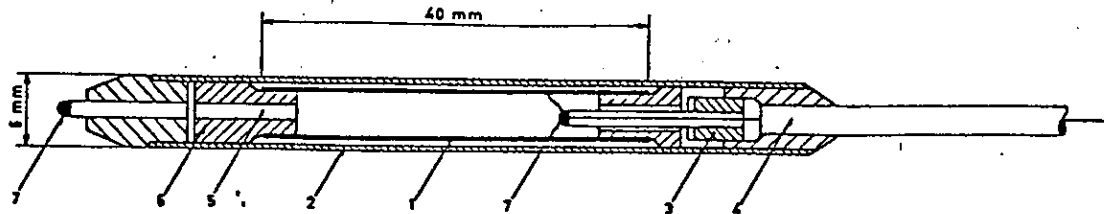


FIG. 10 Schematic diagram of a miniature incore fission chamber.

1 - Electrode, titanium coated with 93% enriched ^{235}U ; 2 - electrode gap, 0.2 mm, filled with argon; 3 - metal to ceramic seal; 4 - mineral-insulated cable, one core, Inconel sheath; 5 - channel to fill chamber with argon; 6 - ceramic electrode alignment; 7 - braze.

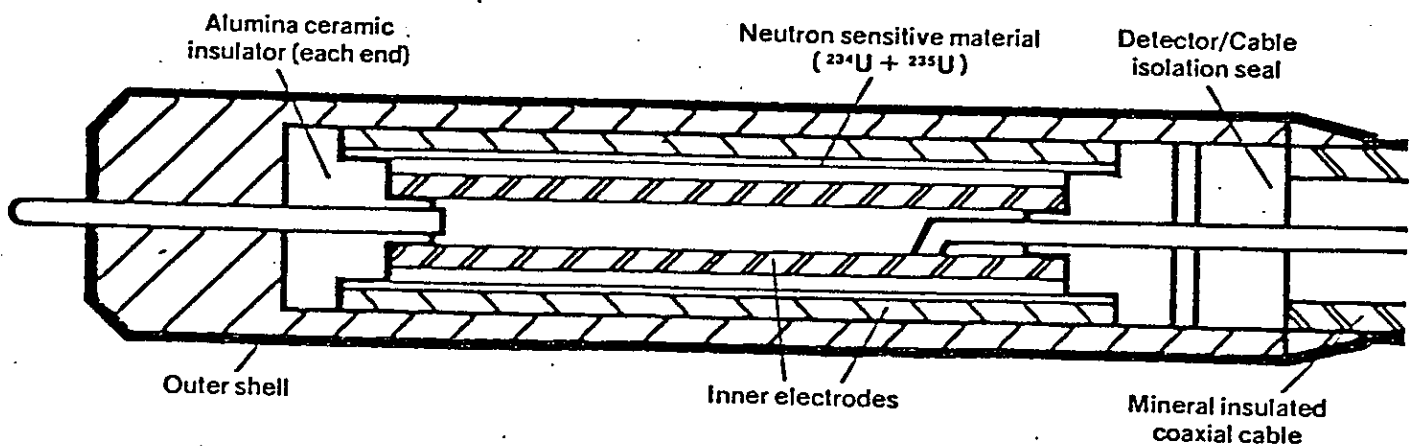


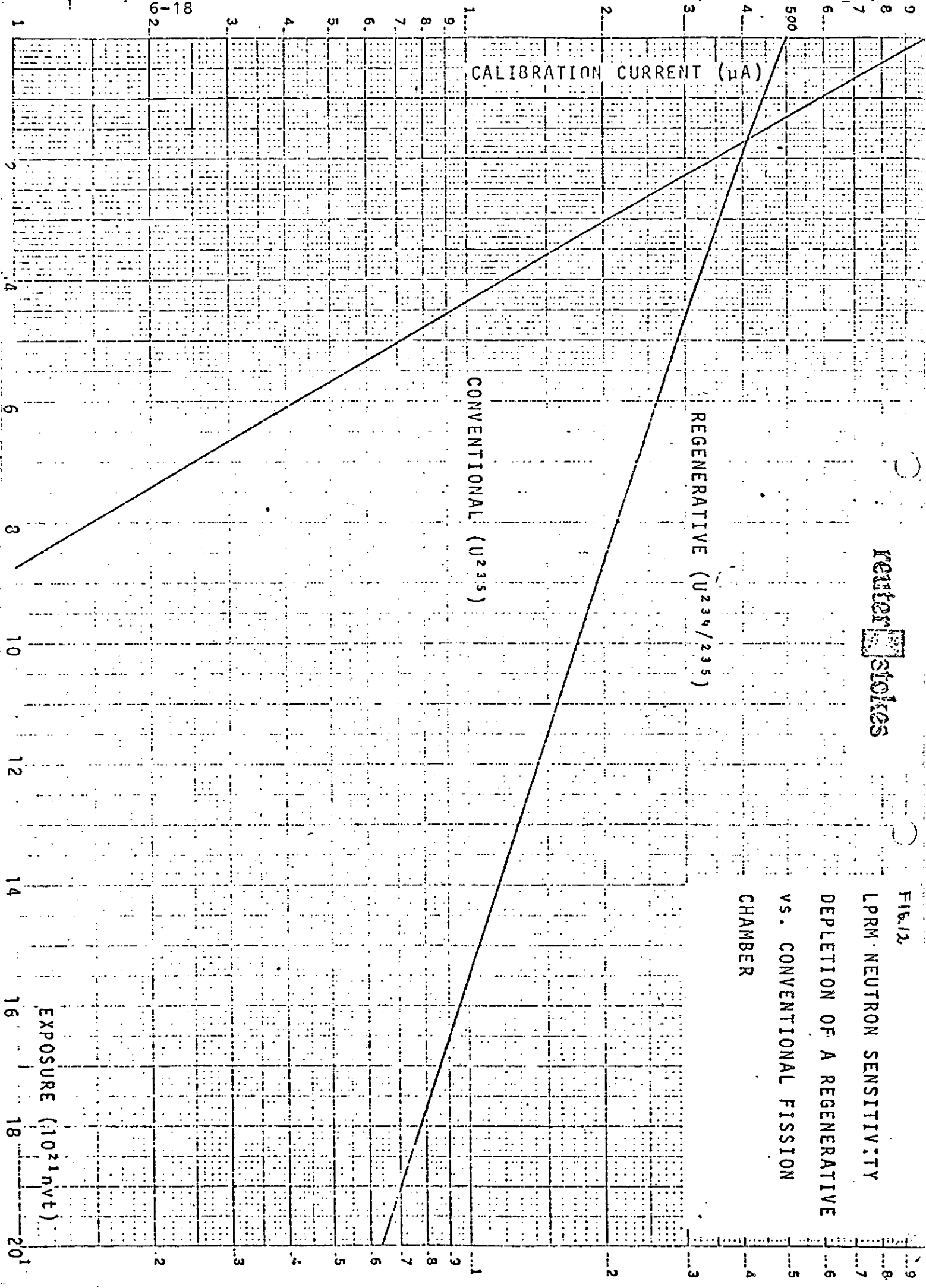
FIG. 11

RS-C6-1100-21X regenerative LPRM

Reuter Stokes

FIG. 12

LPRM NEUTRON SENSITIVITY
DEPLETION OF A REGENERATIVE
VS. CONVENTIONAL FISSION
CHAMBER



MUUT REAKTORITYYPIT

- KAASUJÄÄHDYTTTEISET REAKTORIT
 - EI YLEENSÄ IN-CORE NEUTRONIVUOMITTAUSJÄRJESTELMÄÄ
 - TERMOPAREJA SAATTAO OLLA MONIA SATOJA

- CANDUT
 - V- JA/TAI PT-DETEKTOREJA

- RBMK
 - AG- JA/TAI V-DETEKTOREJA

- LMFBR
 - EI IN-CORE NEUTRONIVUOMITTAUKSIA
 - ON TERMOPAREJA

KIRJALLISUUSVIITTEITA

- (1) BOLAND J.F.: NUCLEAR REACTOR INSTRUMENTATION (IN-CORE), GORDON AND BREACH 1970
- (2) Böck H.: MINIATURE DETECTORS FOR REACTOR IN-CORE NEUTRON FLUX MONITORING, ATOMIC ENERGY REVIEW 14 (1976) PP. 87 - 132.
- (3) Böck H., KROON J., LAAKSONEN T.: THE PERFORMANCE OF SELF-POWERED DETECTORS IN PRESSURIZED WATER REACTORS AND IN CANDU REACTORS, BRNO INTERNATIONAL TRADE FAIR IN SEPTEMBER 1979, 23 P.
- (4) HARRER J. M., BECKERLEY J.G.: NUCLEAR POWER REACTOR INSTRUMENTATION HANDBOOK, VOL. 1 AND VOL. 2, OFFICE OF INFORMATION SERVICES USAEC 1973 (VOL. 1) AND 1974 (VOL. 2)
- (5) INSKO: YDINVOIMALAITOKSEN INSTRUMENTOINTI JA SÄÄTÖ, INSKO 91 - 73
- (6) LAAKSONEN T.: IN-CORE NEUTRON FLUX AND TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM IN LOVIISA 1 NUCLEAR POWER STATION, PROCEEDINGS OF THE IAEA/NPPCI SPECIALIST MEETING ON DESIGN OF NPPCI ELECTRONIC EQUIPMENT TO ACHIEVE ELECTRO-MAGNETIC COMPATIBILITY, WINFRITH, ENGLAND, 1978

SISÄLTÖ

7.	HÄTÄJÄÄHDYTYSKOKEET	
7.1.	JOHDANTO	3
7.2	YDINREAKTORIN JÄÄHDYTTEENMENETYSONNETTOMUUS	3
7.3	TIETOKONEOHJELMISTA	5
7.3.1	Tietokoneohjelmien ryhmittely	5
7.3.2	Tietokoneohjelmien perusta	7
7.4	KOELAITTEISTOT	9
7.5	REWET-PROJEKTI	11
7.5.1	REWET-I laitteisto	11
7.5.2	REWET-II	15
	LÄHDELUETTELO	17

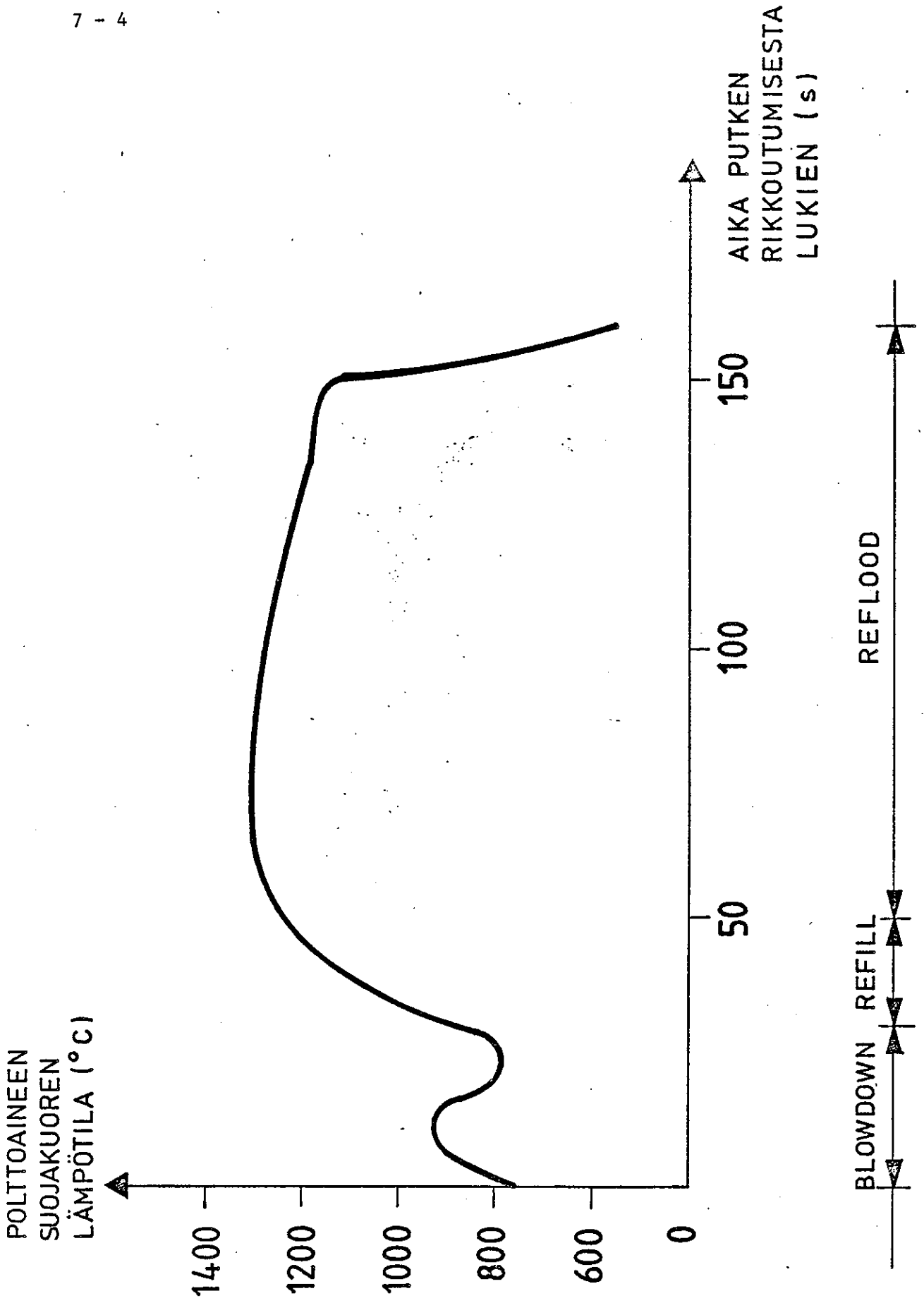
7.1 JOHDANTO

Ydinvoimalaitosten lämpö- ja virtausteknillisen turvallisuustutkimuksen tarkoituksena on luoda menetelmät, joilla analyttisesti voidaan kuvata reaktorin jäähdytysominaisuuksia kaikissa mahdollisissa onnettomuustilanteissa. Tällaisissa onnettomuustilanteissa reaktori vuodon seurauksena menettää oleellisen osan jäähdytysjärjestelmästä. Reaktorin pikasulusta huolimatta polttoainesauvojen suojakuoret alkavat kuumeta polttoaineeseen varastoituneen lämmön ja fissiotuotteiden hajoamisesta johtuvan jälkilämmön ansiosta. Reaktorin turvajärjestelmien on kyettävä kaikissa olosuhteissa estämään polttoainesauvojen ylikuumentuminen.

Turvallisuusanalyysin tietokoneohjelmilla pyritään simuloimaan mahdollisia onnettomuustilanteita onnettomuuksien ja häiriöiden analysointia varten. Simulointiohjelmien kehitykseen on käytetty ja käytetään jatkuvasti suuria tutkijakapasiteetteja. Jäähdytyspiirin geometrian monimutkaisuudesta ja moni-ilmeisyydestä johtuen termohydrauliikan kuvaus tietokoneohjelmilla on osoittautunut hankalammaksi tehtäväksi kuin aikaisemmin oletettiin. Tietouden lisääntyessä ongelma on vaikeutunut. On havaittu, että monesti hyvin paikalliset ilmiöt vaikuttavat ratkaisevasti tapahtumien kulkuun. Paikallisten vähäpätöisiltä tuntuvien ilmiöiden johdosta voi pitkälle kehitettyjen ja suurien tietokoneohjelmien laskemat tulokset olla täysin väärinä. Laskujen luotettavuuden testaamiseksi onkin kaikissa ydinvoimatekniikkaa hyväksi käyttävissä maissa käynnissä kokeellisia tutkimusohjelmia.

7.2 YDINREAKTORIN JÄÄHDYTTEENMENETYSONNETTOMUUS

Ydinreaktorin jäähdytteenmenetysonnettomuudella (Loss of Coolant Accident = LOCA) tarkoitetaan tilannetta, jossa vuodon seurauksena oleellinen osa reaktorin jäähdytysvedestä poistuu jäähdytyspiiristä. Onnettomuus voidaan jakaa ns. suuren murtuman LOCA:n tai pienen murtuman LOCA:n (Large LOCA tai Small break LOCA). Suurella LOCA:lla tarkoitetaan primäärikierron pääputken murtumaa, jossa putken päät murtumakohdassa irtoavat toisistaan. Murtuman jälkeen reaktorin paineastia tyhjenee nopeasti vedestä (Blowdown-vaihe) ja polttoainesauvaan varastoitunut lämpö yhdessä



Kuva 1. Ydinreaktorin polttoainesauvan suojakuoren lämpötilan vaihtelu jäähdytteen-
menetysonnettomuuden eri vaiheissa.

fissiotuotteiden hajoamisen aiheuttaman jälkilämmön kanssa aiheuttaa polttoaineen suojakuoren kuumenemisen. Blowdown-vaiheen alussa käynnistyvät korkeapainehätäjäähdytyspumput ja loppuvaiheessa alkavat typpi-kaasulla paineistetut hätäjäähdytysakut purkaa vettä reaktorisydämeen.

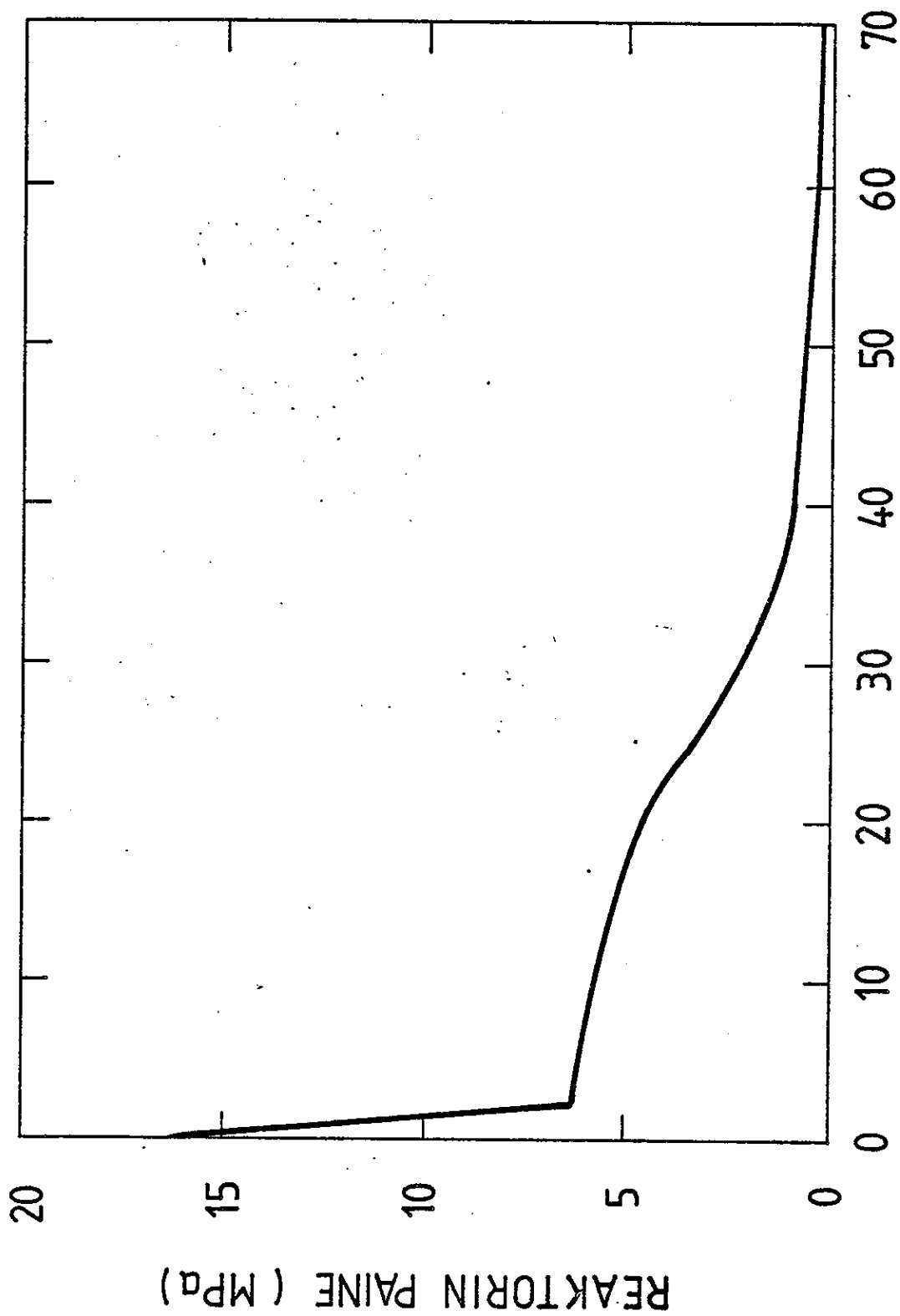
Paineen laskettua reaktorin paineastiassa käynnistyvät matalapainehätäjäähdytyspumput ja hätäjäähdytysvesi alkaa täyttää paineastian alatilaa. Paineastian alatilan täyttymisvaiheen aikana (refill-vaihe) vain höyry jäähdyttää polttoainesauvoja ja polttoainesauvojen suojakuoret kuumenevat yhä. Veden noustua reaktorisydämeen alkaa ns. reflood-vaihe, jolloin reaktorisydämessä esiintyy höyry- ja sekoittunutta höyrypisaravirtausta, kalvokiehuntaa, kuplakiehuntaa ja nestevirtausta sekä näiden virtaus- ja kiehuntamuotojen muutosvaiheet. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty reaktorin paine- ja lämpötiläkäyrät jäähdytteenmenetysonnettomuuden aikana. Kuvassa 3 on esitetty reflood-vaiheen virtausmuodot lämmönsiirtokertoimiseen.

Pienellä LOCA:lla tarkoitetaan reaktorin virtauspiirissä olevien pienten murtumien tai operaattorien toiminnan aiheuttamia jäähdytteenmenetysonnettomuuksia. Näissä onnettomuuksissa reaktori menettää osan jäähdytysvedestään, mutta hätäjäähdytysjärjestelmien ansiosta reaktorisydämen paineen lasku saadaan rajoitettua. Reaktorisydämessä vallitsevan korkean paineen ansiosta sydämessä oleva veden jäähdytysvaikutus on hyvä, mutta toisaalta paineastiaan on vaikea saada uutta vettä.

7.3 TIETOKONEOHJELMISTA

7.3.1 Tietokoneohjelmien ryhmittely

Tietokoneohjelmistot voidaan jaotella useilla eri tavoilla. Ohjelmien käyttötavan perusteella puhutaan joko lisensiointiohjelmista tai realistisen arvioinnin ohjelmista. Lisensiointiohjelmilla (Evaluation Models) suoritetaan ydinvoimalaitosten turvallisuusanalyysit ja tällöin kiinteästi määritetyillä riittävällä konservatiivisilla menetelmillä arvioidaan laitoksen ominaisuuksia sallittuihin turvallisuusehtoihin verrattuna (esim. polttoainesauvojen suojakuoren sallittu suurin lämpötila). Realistisen arvioinnin (Best-estimate model) ohjelmilla pyritään pääsemään mahdollisimman oikeaan tulokseen.



AIKA MURTUMASTA (s)

Kuva 2. Ydinreaktorin primaaripiirin paineen vaihtelu jäähdytteenmenetysonnettomuuden eri vaiheissa.

Käyttökohteen mukaan ohjelmat jaetaan systeemiohjelmiin ja erillisohjelmiin. Erillisohjelmissä kuvataan yksityiskohtaisesti jokin reaktorin osa ja tälle osalle asetetaan tunnetut reunaehdot. Systeemiohjelmilla kuvataan reaktorin jokin kokonaisuus esim. PWR:n primääripiiri, jolloin voidaan analysoida koko systeemin vaikutusta transienttiin.

7.3.2 Tietokoneohjelmien perusta /1/

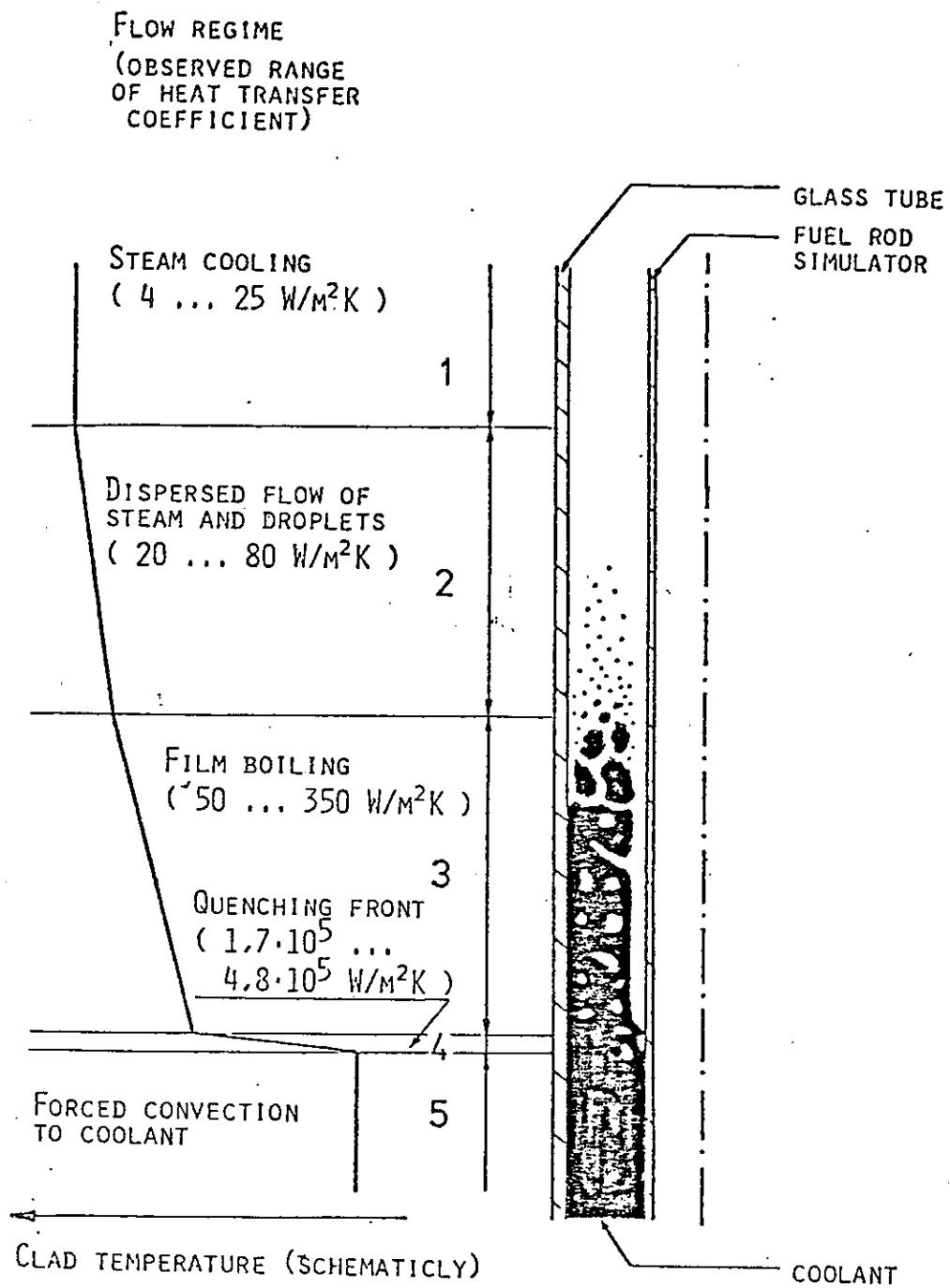
Tietokoneohjelmien perustan muodostavat yleensä massa, liikemäärän ja energian säilymisytälöt vedelle ja höyrylle. Täydellinen kaksifaasivirtauksen kuvaus käsittää kuusi säilymisytälöä. Monissa malleissa tehdään kuitenkin kompromisseja korvaamalla jokin säilymisytälöistä yksinkertaistetulla oletuksella: esimerkiksi höyry kyllästyslämpötilassa tai vesi kyllästyslämpötilassa tai liikemääräytälö vain seokselle drift-flux-mallin muodossa (drift-flux-malli antaa tuloksena höyryn ja veden suhteellisen nopeuden seoksessa).

Varsinainen fysiikka sisältyy kuitenkin vuorovaikutuskorrelaatioihin.

Näitä ovat:

- lämmönsiirtokorrelaatiot seinämistä höyryyn ja veteen, veden ja höyryn välillä sekä suoraan seinämien välillä
- kitkavuorovaikutus seinän ja höyryn, seinän ja veden sekä veden ja höyryn välillä
- massalähteet vetenä ja höyrynä sekä massasiirto faasien välillä
- kemialliset reaktiot ja niiden vaikutukset
- erityiskorrelaatiot hankalien termodynaamisten ilmiöitten kuvaamiseen, esimerkiksi sammutusrintaman eteneminen refllood-vaiheessa, hydrodynaaminen virtausrajoitus, ns. counter-current-flow-limitation (CCFL), entrainment pisaroina veden pinnasta.

Esimerkiksi RELAP4-Mod6 sisältää höyryn ja veden lisäksi vielä kuvauksen myös liukenemattomien kaasujen käyttäytymiselle.



Kuva 3. Reflood-vaiheen virtausmuodot ja lämmönsiirtokertoimet
REWET-I kokeessa.

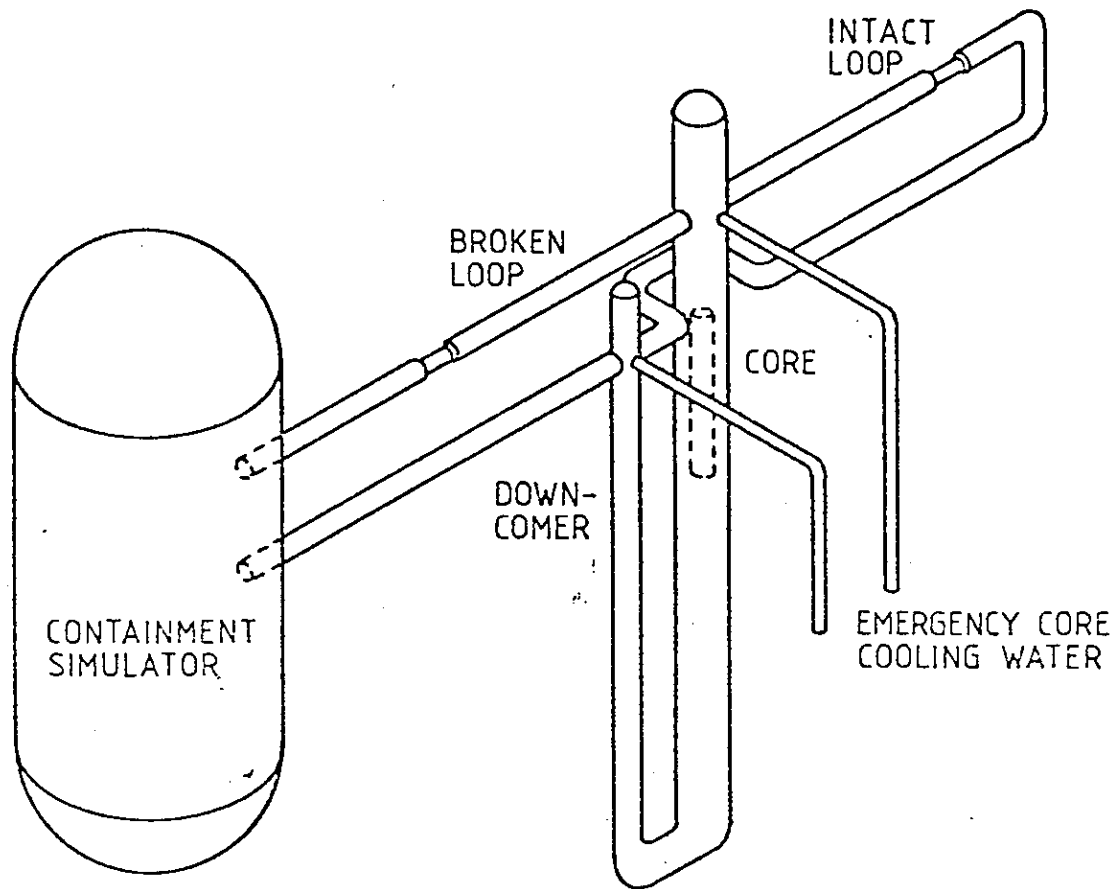
7.4 KOELAITTEISTOT

Jäähdytteenmenetysonnettomuuden termohydrauliikan ilmiöiden mutkikkudesta johtuen on ydinvoimatekniikkaa hyväksi käyttöviin maihin rakennettu useita koelaitteistoja, joihin kaikkiin on pyritty saamaan jokin erikoispiirre. Laitteistot ovat joko erillisilmiöitä tutkivia laitteistoja, joilla pyritään simuloimaan vain yhtä jäähdytteenmenetysonnettomuuden vaihetta tai sitten laitteistoja, joilla tehdään ns. integroituja kokeita. Näissä integroiduissa kokeissa kuvataan yhdellä kertaa kaikki jäähdytteenmenetysonnettomuuden vaiheet blowdown-vaiheesta aina sydäntä simuloivan osan jäähtymiseen asti.

Koelaitteissa polttoainesauvoja simuloi sähköisesti lämmitettävät teräs-sauvat, joissa on täytteenä ydinpolttoaineen kanssa samanlaiset lämpöominaisuudet omaava aine kuten magnesiumoksidi tai boorinitridi. Ydinvoimalaitoksesta kuvataan yleensä yksi rikkoutunut piiri, yksi ehjä piiri, reaktorisydämen ylä- ja alatila, alastulotila sekä reaktorin sydän. Kokeiden tarkoituksesta johtuen kuvataan lisäksi muita osia putkilla, venttiileillä tai pienoismalleilla (esim. lämmönvaihtimet).

Koelaitteistojen eri osat mitoitetaan niin, että laitteiston laskennallisen stationääritilan tehon suhde tilavuuteen on sama kuin kuvattavan ydinvoimalaitoksen lämpötehon suhde ydinvoimalaitoksen vastaavaan tilavuuteen. Toinen koelaitteistoille asetettava vaatimus on reaktorin sydämen geometrian ja korkeuden tarkka kopiointi. Erityisongelmia tutkittaessa joudutaan koelaitteiston sydämeen tekemään muutoksia. Näistä kahdesta suunnitteluvaatimuksesta on seurauksena laitteiston tilavuuksien pienentäminen koelaitteiston polttoainesauvasimulaattorien ja ydinvoimalaitoksen polttoainesauvojen lukumäärän suhteella. Kolmas tärkeä suunnitteluperiaate koelaitteistoille on eri komponenttien asemakorkeuksien säilyttäminen, jotta hydraulisenpaineen vaikutus tulisi kokeissa esiin (kuva 4).

Eri maissa ja eri projekteissa koelaitteistojen rakentaminen on aloitettu yhden koesauvan laitteistoilla. Seuraavana vaiheena on ollut 4 - 40 sauvan koelaitteistot ja nyt rakennetaan jo ydinvoimalaitosten pienoismalleja, joissa on satoja polttoainesauvasimulaattoreja. Alan huippu on USA:ssa Idaho Fallsissa sijaitsevan 55 MW(t) LOFT-reaktori (Loss-of



Kuva 4. REWET-II-laitteiston suunnitteluperiaatteet.

Fluid-Test), jossa sähköllä lämmitettävät polttoainesauvasimulaattorit on korvattu ydinpolttoainesauvoilla.

7.5 REWET-PROJEKTI

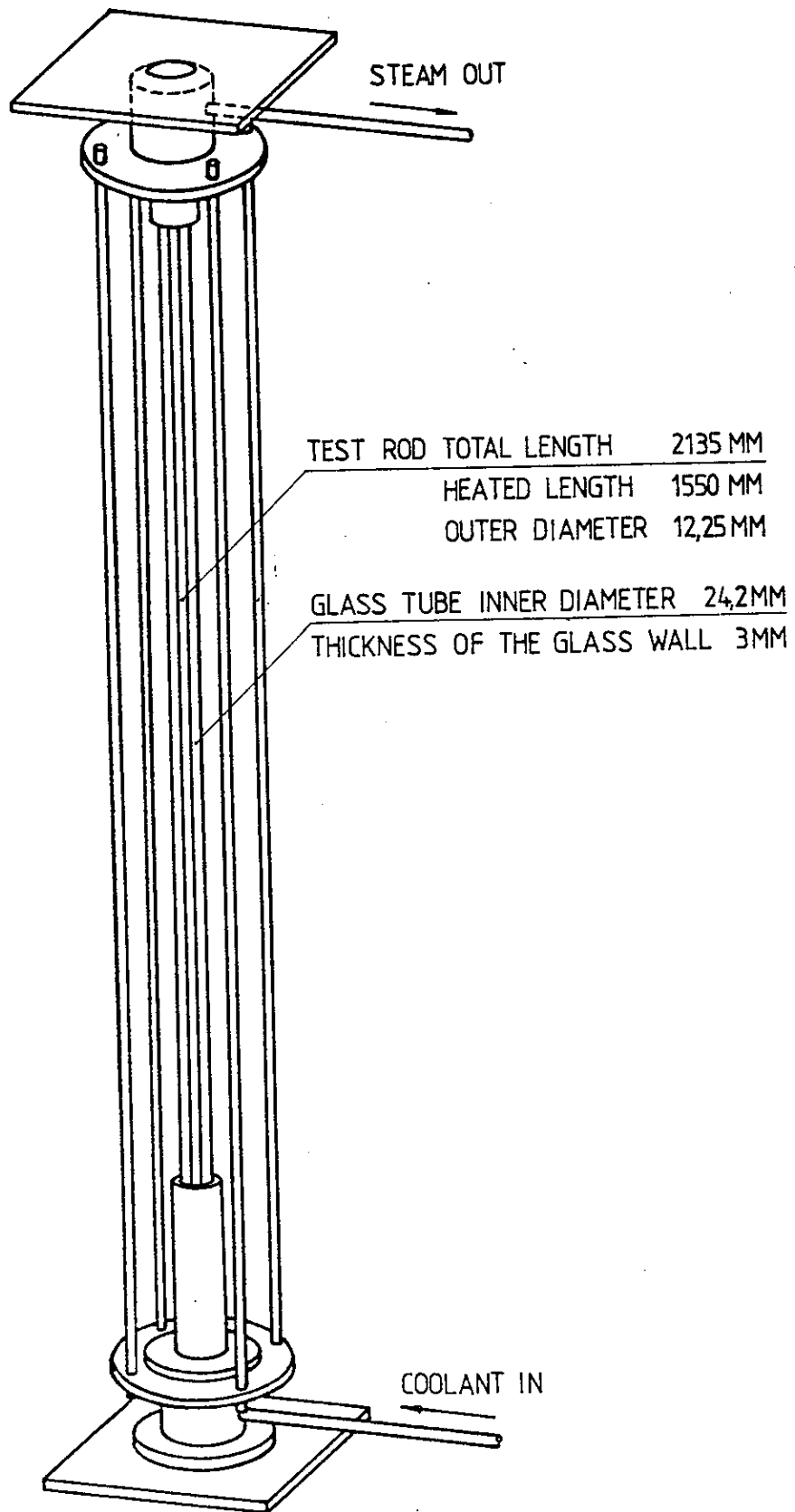
REWET-projekti käynnistettiin vuonna 1976. Projektin tarkoituksena on lisätä uudelleenkastumisilmiön ja veden kaksifaasivirtauksen tuntemusta, havainnollistaa jäähtytteenmenetyssonnettomuuden jälkeistä polttoainesauvojen uudelleenkastumista, tuottaa mittaustuloksia laskennallisten analyysien tueksi sekä tarkentaa käytössä olevia kokeellisia korrelaatioita. Koeohjelmissa kiinnitetään erityistä huomiota suomalaisten reaktorien erityispiirteisiin. Kokeiden pohjalta näiden erityispiirteiden vaikutus huomioidaan turvallisuusanalyysien tietokoneohjelmissa.

7.5.1 REWET-I laitteisto /2/

REWET-projektin kokeellinen toiminta aloitettiin REWET-I laitteistolla. Laitteiston suunnittelun lähtökohtana oli saada havainnollistettua uudelleenkastumistapahtuma ja mahdollisuus elokuvata sammutusrintaman eteneminen. Laitteiston koeosan muodostavat ontto sähköllä lämmitettävä teräsputki ja sen ympärillä lasiputki (Kuva 5). Jäähdytysvesi virtaa teräsputken ja lasiputken välissä. Koeosan termohydraulinen halkaisija on sama kuin Loviisan reaktorien sydämen virtauskanavien termohydraulinen halkaisija. Taulukossa 1 on esitetty laitteiston päämitat sekä koeparametrien vaihtelualueet.

Ennen koetta koelaitteisto lämmitetään 600 kPa kylläisellä höyryllä. Höyrylämmityksen jälkeen koesauva lämmitetään tasasuunnatulla sähköllä haluttuun alkulämpötilaan. Kun haluttu sauvan lämpötila on saavutettu, aloitetaan jäähdytysveden injektointi laitteistoon. Kokeiden aikana sammutusrintaman etenemistä sekä eri virtausmuotoja voi seurata lasiputken lävitse. Osa REWET-I kokeista on elokuvattu.

REWET-I kokeissa on määritetty uudelleenkastumistapahtuman mekanismi sekä koeosassa esiintyvät virtausmuodot (kuva 3), lämmönsiirtokertoimien suuruudet eri alueilla ja eri parametrien vaihtelun vaikutus sammutusrintaman



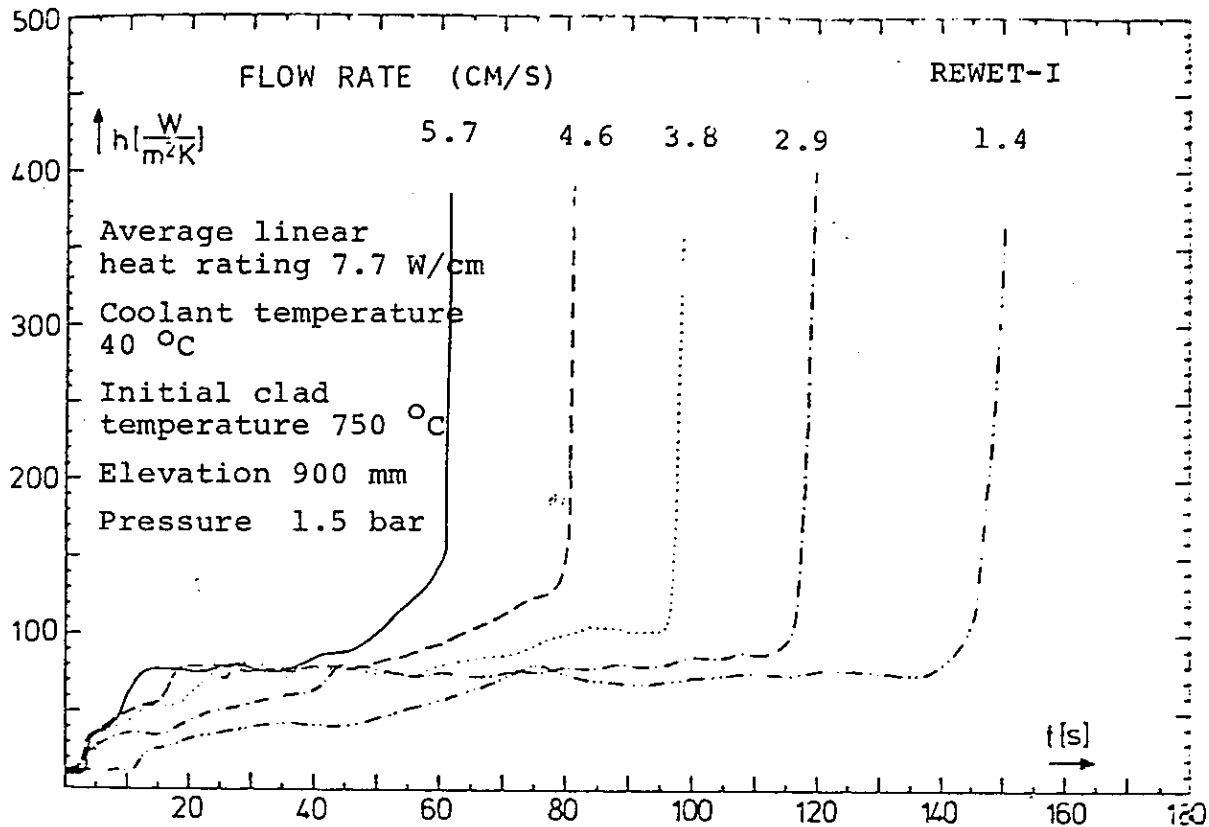
Kuva 5. REWET-I-laitteiston koeosa.

etenemisnopeuteen sekä lämmönsiirtokertoimiin (kuva 6).

REWET-I-kokeissa selvitettiin myös jäädytysvedeen korkeassa paineessa liuonnan typpikaasun (vertaa hätävesiakut) vaikutus uudelleenkastumisilmiöön. Korkeassa paineessa veteen liuennut kaasu vapautui vedestä laitteiston alatilassa, jossa oli alhainen paine. Vapautunut kaasu muodosti alatilassa kaasukuplia, joiden kohoamisnopeus oli suurempi kuin sammutusrintaman kohoamisnopeus. Lämmitessään kuplat kasvoivat nopeasti. Kun kaasukupla kohtasi sammutusrintaman, tipahti sammutusrintama 5-10 cm alaspäin, mutta kohosi nopeasti takaisin entiselle korkeudelle. Sammutusrintaman heilahtelua lukuunottamatta veteen liuenneella typpikaasulla ei ollut muuta vaikutusta koesauvan jäähtymiseen.

TAULUKKO 1. REWET-I-laitteiston päämitat sekä koeparametrien vaihtelualueet

Koesauvan kokonaispituus	213,5	cm
Tehollisen osan pituus	155,0	cm
Koesauvan ulkohalkaisija	12,25	mm
Lasiputken sisähalkaisija	24,2	mm
Koesauvan lämmitysteho	500 - 1600	W/sauva
	3.2 - 10.3	W/cm
Koeosan paine	100 - 400	kPa
Jäädytysveden virtausmäärä	4.7 - 22	g/s
Jäädytysveden lämpötila	18 - 68	°C
Koesauvan suojakuoren alkulämpötila	500 - 820	°C



Kuva 6. Hätäjäähdytysveden virtausmäärän vaikutus suojakuoren ja jäähdytteen väliseen lämmönsiirtokertoimeen.

7.5.2 REWET-II-laitteisto (kuva :7)

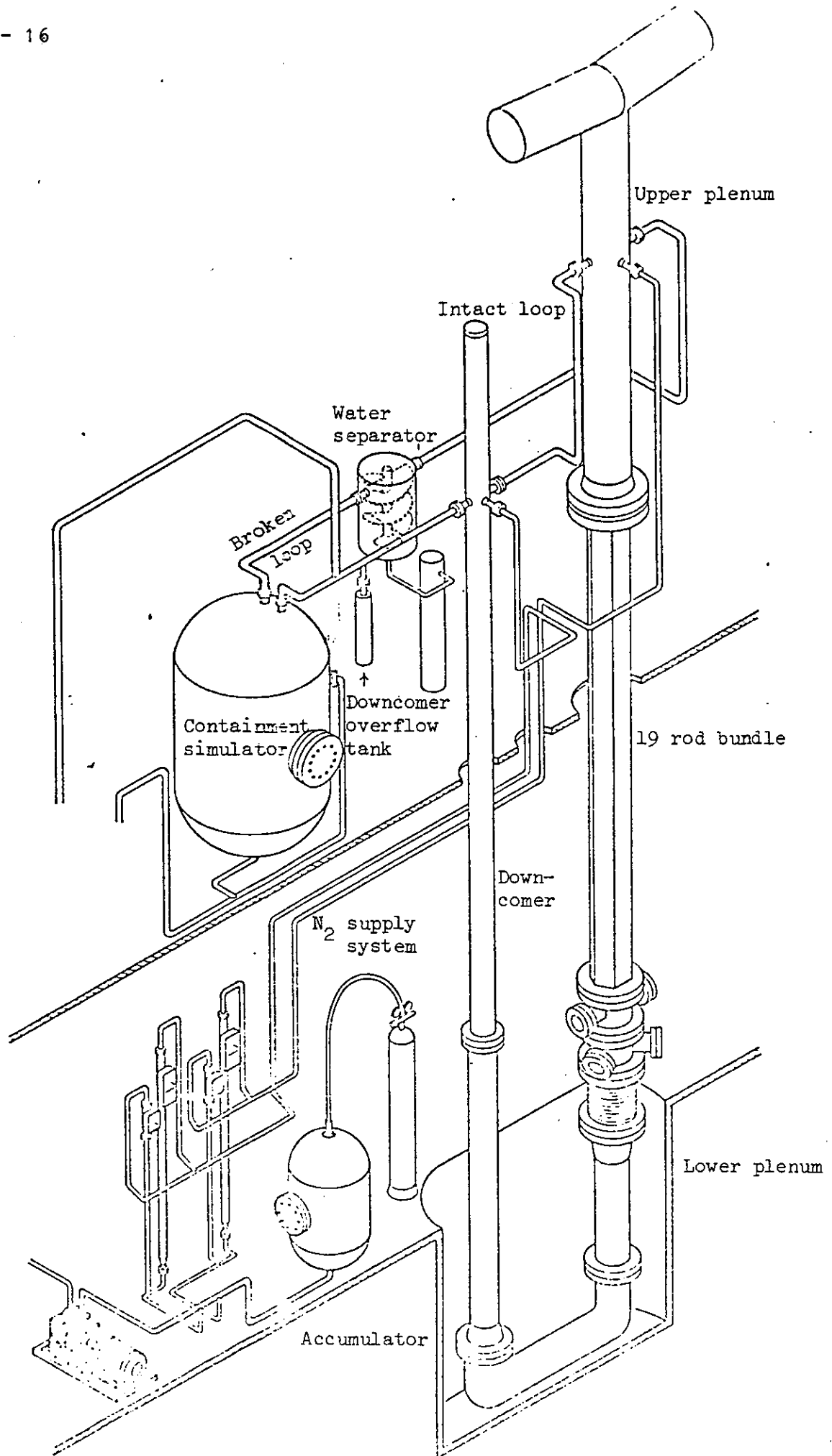
REWET-projektin kokeellista toimintaa jatketaan REWET-II laitteistolla, jolla on tarkoitus tarkistaa tietokoneohjelmia sekä eri korrelaatioiden sopivuutta refllood-vaiheen termohydraulisiin laskuihin. Laitteisto on termohydraulisessa mielessä tarkka jäljennös Loviisan reaktoreista. Laitteiston koeosa muodostuu reaktorin ja laitteiston sauvalukujen suhteessa skaalatusta täysmittaisesta 19 sauvasimulattoria sisältävästä sydäimestä, alatilasta, ylätilasta sekä alastulotilasta. Jäähdytysvesi voidaan injektoida joko ylä- tai alastulotilan kautta sydämeen. Taulukossa 2 on esitetty laitteiston päämitat sekä koeparametrien vaihtelualueet.

REWET-II-kokeet aloitettiin 16.1.1982. Tätä ennen muutamista kokeista on tehty tietokonelaskut NORCOOL-I ja FLOOD-4 ohjelmilla. Alustavina tuloksina voi mainita koesauvojen jäähtyvän heikosti pelkällä ylätilaruiskutuksella, mutta koesauvojen jäähtyminen tehostuu huomattavasti, kun ylätilaruiskutuksen kanssa samanaikaisesti injektoidaan vettä sydämeen myös alastulotilan kautta

TAULUKKO 2. REWET-II-laitteiston päämitat sekä koeparametrien vaihtelualue

Polttoainesauvan simulaattori:

Tehollinen pituus	242	cm
Ulkohalkaisija	9.1	mm
Sauvasimulaattorin lukumäärä	19	
Sauvasimulaattorin keskipisteiden etäisyys	12.2	mm
Sauvanipun lämmitysteho (maks.)	90	kW
	20	W/cm
Jäähdytysveden nousunopeus kylmässä nipussa	0 - 15	cm/s
Sauvasimulaattorien suojakuoren lämpötila (maks.)	1000	°C
Jäähdytteen lämpötila	15 - 120	°C
Koeosan paine	0.1 - 1.0	MPa



Kuva 7. REWET-II-laitteiston koeosa.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Miettinen, J.: Tietokoneohjelmat ydintekniikan termohydrauliikan turvallisuustutkimuksen apuvälineenä. Luento Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa 1981
- /2/ Kervinen, T., Mattila, L.: Experimental studies on Fuel Rod Rewetting during on LWR LOCA (REWET). Final Report of IAEA Research Contract No. 2144/RI/RB, June 29, 1981.

SISÄLTÖ

8. HYBRIDIKONESIMULAATTORIT

8.1	JOHDANTO	3
8.2	ANALOGIAKONE	3
8.3	HYBRIDIKONE	5
8.4	TEKNILLISTEN JÄRJESTELMIEN SIMULOINTI	7
8.5	PWR-SIMULAATTORI	9
8.5.1	Mallin yleiskuvaus	
8.5.2	Ohjelmointiperiaatteet	
8.6	BWR-SIMULAATTORI	15
8.6.1	Mallin yleiskuvaus	
8.6.2	Ohjelmointiperiaatteet	
8.7	LÄHDELUETTELO	21
8.8	LIITTEET	
8.8.1	Periaatekaaviot	
8.8.2	Reaktorin teho	
8.8.3	Lämmönsiirto reaktorissa	

1. JOHDANTO

Maamme rakennettava ydinvoimalaitos joutuu - päinvastoin kuin tähän asti muualla maailmassa - huolehtimaan voimansiirtoverkon taajuuden säädöstä. Suomen verkossa käyttöön otetusta taajuudensäätöjärjestelmästä johtuu, että voimalaitoksen dynaamisen käyttäytymisen on noudatettava melko tarkoin ennalt asetettuja vaatimuksia. Ilman ydinvoimalaitoksen dynaamisen käyttäytymisen tarkkaa tuntemusta on hyvin vaikea todeta, ovatko nämä vaatimukset varmasti täytetyt. Tämän tuntemuksen luomiseksi tarvitaan riittävän tarkka ydinvoimalaitoksen ja siihen liittyvän valtakunnanverkon simulaatiomalli. Koska tällaista Suomen oloja varten laadittua simulaatiomallia ei ollut saatavissa ydinvoimalaitoksen toimittajalta, päätettiin v. 1969 perustaa VTT:n sähkötekniikan laboratorioon työryhmä, jonka tehtävänä on em. simulaatiomallin kehittäminen. Työryhmän käyttöön saatiin keväällä 1970 EAI 690-tyyppinen hybriditietokone. /

Seuraavassa on tarkoitus lyhyesti esitellä hybridikoneen rakennetta ja sen käyttöä ydinvoimalaitoksen simulointiin.

2. ANALOGIAKONE

Sanan yleisimmässä merkityksessä analogialaskimella tarkoitetaan mitä tahansa fysikaalista systeemiä, jossa esiintyvät suureet vastaavat yksikäsitteisellä tavalla laskimella ratkaistavan matemaattisen probleeman muuttujien arvoja, ts. probleeman muuttujien ja systeemin fysikaalisten suureiden välillä vallitsee tietty "analogia". Tavallisesti analogialaskimella tarkoitetaan operaatiovahvistimista, vastuksista ja kondensaattoreista koottua sähköistä laitetta, jossa esiintyvät jännitteet vastaavat probleeman muuttujia. Nykyaikainen rinnakkaislogiikalla varustettu analogiakone käsittää erilaisia lineaarisia ja epälineaarisia matemaattisia operaatioita suorittavia komponentteja. Lineaariset komponentit suorittavat seuraavia operaatioita:

- | | |
|------------------------------|-----------------|
| 1. vakiolla kertominen | ~potentiometrit |
| 2. vastaluvun muodostaminen | ~invertterit |
| 3. algebrallinen yhteenlasku | ~summaimet |
| 4. jatkuva integrointi | ~integraattorit |

Nämä operaatiot riittävät tavallisen vakiokertoimisen differentiaaliyhtälön ratkaisemiseen. Epälineaaristen yhtälöiden ratkaisemiseen tarvitaan lisäksi em. epälineaarisia komponentteja, jotka voivat suorittaa seuraavia operaatioita:

1. kerto- ja jakolasku	~kertoja
2. funktiogenerointi	~funktiogeneraattorit
3. yksinkertaiset loogiset operaatiot	~JA-, TAI-elimet, FLIP-FLOP-it, laskurit, siirtorekisterit jne.

Lisäksi näissä koneissa on erilaisia passiivisia elementtejä, kuten vastuksia, kondensaattoreita ja diodeja sekä kytkentä- ja rajoituselimiä, kuten funktiokytkimiä, komparaattoreita ja rajoittajia.

Analogiakoneen suurimpana etuna voidaan pitää sen kykyä suorittaa rinnakkaisia toimintoja. Päinvastoin kuin digitaalikone, joka suorittaa vain yhden operaation kerrallaan, voidaan analogiakoneella suorittaa kaikki tarvittavat operaatiot samanaikaisesti, koska jokainen em. komponentti voi toimia erillisenä riippumattomana laskentayksikkönä. Näinollen probleeman monimutkaisuus ei pidennä laskenta-aikaa. Lisäksi analogiakoneen ohjelmointi on helppoa ja yhteys ratkaistavaan problemaan säilyy selvänä.

Analogiakoneen varjopuolista taas voidaan mainita sen rajoitettu tarkkuus ja rajoitetut mahdollisuudet useamman muuttujan funktioiden käsittelyyn, loogisiin päätöksiin ja tiedon muistamiseen.

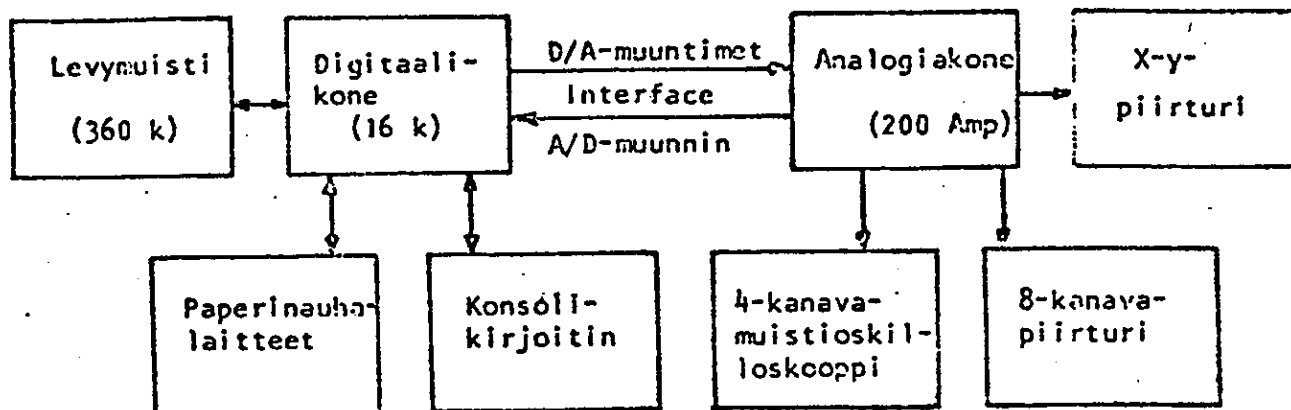
3. HYBRIDIKONE

Kuten analogiakoneella on digitaalikoneellakin monista positiivisista ominaisuuksistaan huolimatta varjopuolia, joista suurin on em. koneen toiminnan sarjamuotoisuus. Koska digitaalikone suorittaa vain yhden operaation kerrallaan, on laskenta-aika voimakkaasti riippuvainen tehtävän laajuudesta ja monimutkaisuudesta. Edelläsanotun nojalla on helppo ymmärtää se ajatuskulku, joka on johtanut hybridikoneen syntymiseen. Yhdistämällä mainitut konetyypit samaan tietokoneeseen voidaan tietyt tehtävät jakaa analogia- ja digitaali-osien kesken siten, että kumpaakin käytetään tehokkaasti hyväksi ja samalla vältetään eri konetyyppien rajoituksista johtuvat haitat.

Näin voidaan saavuttaa seuraavat edut:

- Yhdistetään analogiakoneen nopeus ja digitaalikoneen tarkkuus
- Lisätään analogiakoneen tehokkuutta ja joustavuutta käyttämällä digitaalikoneen muistia, laskentakapasiteettia ja monipuolisia ohjausmahdollisuuksia
- Lisätään digitaalikoneen laskentanopeutta käyttämällä analogia-alirutiineja.

Hybridikone on siis tietokone, jossa on yhdistetty analogia- ja digitaali-kone erityisen interface-yksikön avulla. Interface-yksikkö sisältää koneen ohjauslogiikan sekä analogia-digitaali (AD) ja digitaali-analogia (DA) muuntimet. Viimeksimainitut tarvitaan johtuen lukujen erilaisesta esitystavasta eri koneissa: analogiakoneessa tiettyä lukua vastaa tietty jännite, digitaalikoneessa taas määrätyn rekisterin tietty konfiguraatio.

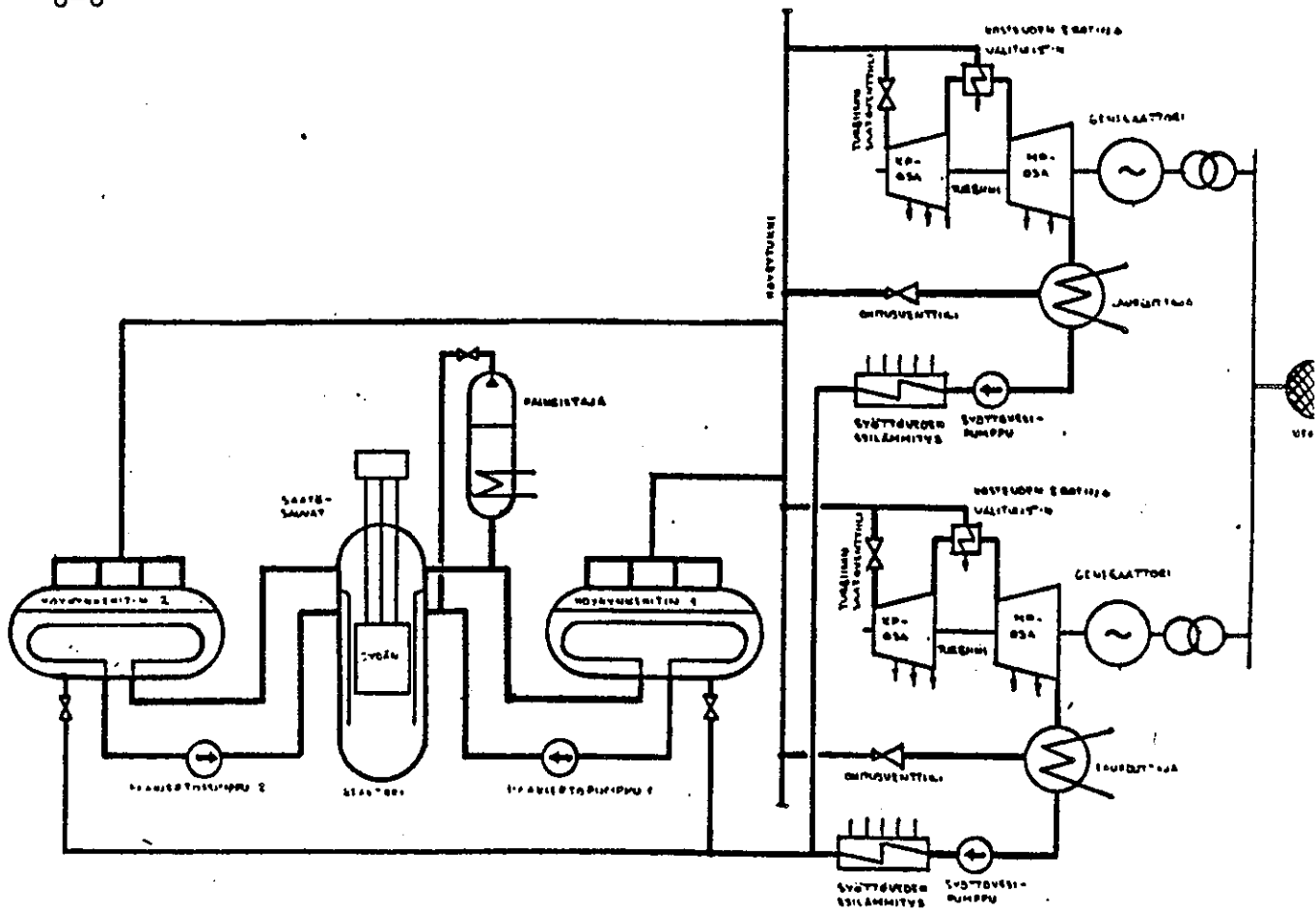


Kuva 1. Nykyaikaisen hybridikoneen rakennekaavio

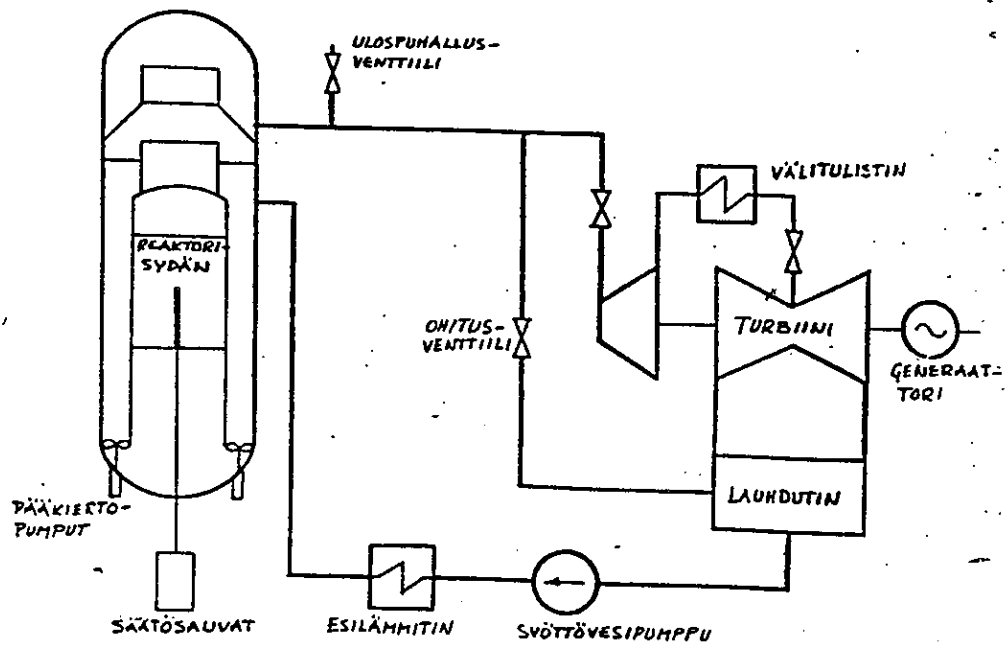
Tyypillisessä hybridikonesovelluksessa koneen analogiaosaa käyteään tehtävässä esiintyvien differentiaaliyhtälöiden (differentiaaliyhtälö on yhtälö, jossa ratkaistavan suureen lisäksi esiintyy myös sen muutosnopeus 1. derivaatta) ratkaisemiseen 1. integroimiseen ja digitaali-osaa tehtävien muiden osien laskemiseen, esim. useamman muuttujan funktioiden ja aikavii-veiden generointiin.

4. TEKNILLISTEN JÄRJESTELMIEN SIMULOINTI

Teknillisen järjestelmän dynaamista käyttäytymistä (so. systeemin fysikaalisten suureiden ajallista vaihtelua) halutaan usein tutkia jo suunnitteluvaiheessa, jolloin ei ole mahdollista suorittaa mittauksia itse systeemissä ja näin saada tietoa sen käyttäytymisestä. Samanlaisen tilanteen eteen joudutaan, kun halutaan tutkia jo olemassa olevan systeemin käyttäytymistä sellaisessa tilanteessa, jota ei itse systeemissä voida toteuttaa. Systeemin dynamiikka on tällöin selvitettävä käyttämällä tähän tarkoitukseen kehitettyä mallia, jonka käyttäytyminen (ainakin likimäärin) noudattaa alkuperäisen systeemin käyttäytymistä eli simuloi sitä. Tällainen malli



Kuva 1. PWR-laitoksen periaatekaavio



Kuva 2. BWR-laitoksen periaatekaavio

voi olla joko fysikaalinen (esim. pienoismalli t. prototyyppi) tai matemaattinen so. yhtälö tai yhtälöryhmä, joka kuvaa systeemin fysikaalisten suureiden välistä riippuvuutta. Monimutkaisen systeemin matemaattinen malli on yleensä niin laaja ja mutkikas, että sitä ei ilman tietokoneen apua voida ratkaista. Jos mallin halutaan antavan systeemin fysikaaliset suureet ajan funktiona samassa tahdissa kuin mitä tutkittavat ilmiöt luonnossa tapahtuvat (ns. reaaliaikavaatimus), tuottaa yhtälöiden ratkaiseminen digitaalitietokoneella usein suuria vaikeuksia. Tarvitaan hyvin suuri ja nopea tietokone, joten mallin kustannukset nousevat suuriksi. Tällaiset tehtävät voidaan usein ratkaista edullisesti analogia- tai hybriditietokoneilla. Jos mallin yhtälöt sisältävät vain tavallisia differentiaaliyhtälöitä, riittää pelkkä analogiakone, osittaisdifferentiaaliyhtälöitä sisältävä malli sen sijaan yleensä vaatii hybridikoneen käyttöä.

5 PWR-SIMULAATTORI

5.1 Mallin yleiskuvaus

Kuvassa 1 on esitetty laitoksen pääkomponentit, jotka on sisällytetty simulointimalliin.

Höyrygeneraattorit on ryhmitetty kahteen ryhmään siten, että toisessa on viisi ja toisessa yksi. Tällä tavalla voidaan simuloida yhden primääripumpun pysähtyminen. Kumpikin turbiini on kuvattu erikseen, samoin turbiinien välinen tehonjakolaitteisto.

Neutronikinetiikka on kuvattu yksidimensioisella yksiryhmädiffuusioyhtälöllä, jossa neutronivuon aikaderivaatta on asetettu nolaksi ("prompt jump" -approksimaatio). Viivästyneet neutronit on kuvattu kahdella ryhmällä, joiden osuudet ja aikavakiot on valittu niin, että taajuusvaste yhtyy 6-ryhmämallin taajuusvasteeseen pienillä ja suurilla taajuuksilla. Reaktiivisuus on oletettu lineaariseksi funktioksi polttoaineen ja veden lämpötiloista, xenon-konsentraatiosta, säätösauvojen sijainnista ja boorikonsentraatiosta.

Kinetiikkayhtälöt ratkaistaan digitaalikoneessa 0.2 sek. aikaväleihin 8:ssä jakopisteessä. Tuloksena on aksiaalinen tehojakautuma sekä kokonaislämpöteho ajan funktiona. Jodi- ja xenon-konsentraatiot lasketaan samoissa 8:ssä jakopisteessä 2 sek. välein. Xenon-transientin laskenta voidaan nopeuttaa 20- tai 200-kertaiseksi.

Reaktorisydämen lämmönsiirto yhtälössä ovat muuttujina aika ja aksiaalinen paikkakoordinaatti. Säteiläinen jakautuma on jätetty pois, ja malli kuvaa keskimääräistä kanavaa.

Kaiken neutronitehon oletetaan kehittyvän polttoaineessa, jonka lämpötila kuvataan säteen suunnassa keskiarvolla. Lämmönsiirtokerroin polttoaineesta veteen riippuu polttoaineen lämpötilasta ja veden virtausnopeudesta.

Lämmönsiirtoa kuvaava osittaisdifferentiaaliyhtälö ratkaistaan diskretoimalla aika ja integroimalla aksiaalisen paikkakoordinaatin suhteen analogiakoneessa.

Säätösauvoja voidaan liikuttaa jatkuvasti, yhtä ryhmää kerrallaan. Lisäksi voidaan kuvata pikasulku, jolloin sauvat pudotetaan nopeasti alas.

Jäähdytteen sekoittuminen oletetaan täydelliseksi reaktoritankin ylä- ja alaosassa; sekoitusyhtälöt ratkaistaan digitaalikoneessa. Kulkuviiveet primääriputkissa generoidaan samoin digitaalikoneessa. Putkimateriaalin lämpökapasiteetin vaikutus viiveeseen otetaan huomioon kertomalla virtausajat ykköistä suuremmalla vakioilla.

Paineistaja on jaettu vesi- ja höyrytilavuuteen, ja näiden välinen lämmönsiirto oletetaan nolllaksi. Sekoitus oletetaan täydelliseksi kummassakin osassa erikseen, ja höyryn oletetaan kondensoituvan vain suihkupisaroihin. Suihku ja sähkölämmittimet oletetaan hitaudettomiksi. Paine lasketaan kyllästystilan mukaan

Höyrygeneraattorin lämmönsiirto kuvataan samanlaisella osittaisdiff.yhtälöllä kuin reaktorisydämessä. Lämmönsiirtokerroin on verrannollinen primääriveden nopeuden potenssiin 0.8 ja lämpövuon potenssiin $2/3$. Höyrygeneraattoreissa oletetaan vallitsevan sama kyllästyspaine. Kyllästyspainekäyrä on linearisoitu nimellistilan ympärille, jolloin paine voidaan laskea tavallisesta differentiaaliyhtälöstä, joka kuvaa energiabalanssia sekundäärivedessä.

Höyrygeneraattorien pinnankorkeus lasketaan olettaen, että kaikki höyry muodostuu pinnan alapuolella höyrykuplissa, joiden keskimääräinen nousuaika on funktio kokonaishöyryvirrasta. Funktio annetaan sisäänmenodatana ohjelmalle.

Höyryputket on kuvattu painehäviönä, joka on verrannollinen höyryvirran neliöön. Putkien tilavuus on yhdistetty höyrygeneraattorin höyrytilavuuteen.

Turbiinin mallissa on höyryventtiilin ja säätöpyörän epälineaarinen kuvaus. Turbiinin menevä höyryvirta lasketaan funktiona venttiilin avautumasta sekä paineesta ennen venttiiliä ja säätökammion paineesta interpoloimalla 3-dimensioisesta taulukosta. Myös muut osat turbiinin mallia samoin kuin kosteuden-erottimen, välitulistimen ja syöttöveden esilämmittimien mallit ovat epälineaarisia.

Ohitusventtiilin höyryvirta riippuu epälineaarisesti tuorehöyryn paineesta ja venttiilin avautumasta. Suure $\sqrt{p/v}$ virtausta kuvaavassa yhtälössä on mallissa höyryn lämpötilan lineaarinen funktio.

Generaattori syöttää siirtojohdon välityksellä verkkoa, joka on kuvattu suurena generaattorina. Simulointimallissa on kaksi rinnakkaista turbogeneraattoria, joiden välinen tehonjakolaitteisto on myös kuvattu. Turbogeneraattoreita voidaan ajaa joko rinnakkain tai sarjassa määrätyn kaavion mukaan.

Simulointimalli sisältää myös PWR-laitoksen pääsäätojärjestelmien kuvaukset. Nämä ovat

- laitoksen tehon säätö
- turbogeneraattorien tehon säätö ja tehon jako rinnakkaisten turbiinien kesken
- turbiinin kierrosluvun säätö
- paineen minimirajoitus
- paineen maksimirajoitus (ohitusventtiili)
- höyrygeneraattorien pinnankorkeuden säätö (syöttövesisäätö)
- reaktorin tehon säätö
- paineistajan pinnankorkeuden säätö
- paineistajan paineen säätö.

Säätösystemit on simuloitu analogiakoneessa, jossa niitä on helppo muuttaa tarvittaessa.

Reaktorin rajoitus- ja suojaussysteemit on myös pääosiltaan sisällytetty malliin.

5.2 Ohjelmointiperiaatteet

Ohjelma on jaettu digitaali- ja analogiakoneiden kesken sen mukaan, kumpi soveltuu paremmin kunkin osatehtävän ratkaisuun.

Digitaalikoneeseen on sijoitettu paineistajan malli, neutronien diffuusioyhtälön ratkaisu, reaktorin suojaussysteemit, kulkuviiveet ja sekoitukset sekä turbiinien säätöventtiilit. Lisäksi digitaalikoneessa lasketaan lämmönsiirtokertoimet, kuplien nousuajat ja muita muuttuvia suureita. Ohjelmointi on toteutettu osaksi Fortranilla, osaksi Assemblerilla.

Lämmönsiirtoon liittyvät osittaisdiff.yhtälöt ratkaistaan diskretoimalla aika ja integroimalla paikkakoordinaatin suhteen analogiakoneen nopeassa osassa (aikavakio 1 ms). Kullakin aika-askeleella saadut lämpötilajakautumat varastoidaan digitaalikoneeseen.

Muu osa mallista, kuten pääosa säätösysteemeistä ja itse prosessista, on kuvattu algebrallisilla yhtälöillä ja tavallisilla diff.yhtälöillä, jotka ratkaistaan analogiakoneen hitaassa osassa (aikavakio 1 s).

6. BWR-SIMULAATTORI

6.1 Mallin yleiskuvaus

Kuvassa 2 on esitetty ne TVO 1:n pääkomponentit, jotka on sisällytetty malliin.

Pääkiertopumput on kuvattu kahtena yksikkönä, joista toinen vastaa viittä pumppua ja toinen yhtä pumppua, joka voidaan myös pysäyttää. Samoin syöttövesipumput on kuvattu kahtena yksikkönä, joista toinen vastaa kahta pumppua ja toinen yhtä, joka voidaan pysäyttää. Näiden lisäksi on yksi varasyöttövesipumppu, joka käynnistyy joko automaattisesti tai käsin. Korkeapaine-esilämmittimiä on rinnakkain kaksi, joista toinen voidaan ohittaa.

Lauhduttimessa oletetaan vallitsevan vakiopaine. Matalapaine-esilämmittimiä ja -pumppuja ei kuvata, vaan oletetaan, että korkeapainepumppujen imupuolella on vakiopaine ja -lämpötila.

Reaktorisydän on kuvattu yhtenä keskimääräisenä virtauskanavana, joka on jaettu pystysuunnassa 16 lohkokoon. Neutronivuon jakautuma lasketaan yksiulotteisella yksiryhmädiffuusioyhtälöllä, jossa on tehty ns. prompt-jump-approksimaatio (s.o. $\frac{dn}{dt} = 0$). Viivästyneet neutronit on jaettu kahteen ryhmään siten, että taajuusvaste yhtyy pienillä ja suurilla taajuuksilla 6-ryhmämallin vasteesseen. Reaktiivisuus on lineaarinen funktio polttoaineen lämpötilasta, hidastimen tiheydestä (~ aukko-osuus), säätösauvatiheydestä ja xenon-konsentraatiosta. Diffuusiokerroin on toisen asteen funktio hidastimen tiheydestä. Kinetiikka-yhtälöt ratkaistaan 16 pisteessä 0,1 sekunnin väliajoin, jolloin saadaan reaktorin neutronitehon jakautuma ajan funktiona. Jälkilämpö lasketaan summana vakio-termistä ja 50 sekunnin aikavakiolla vaimenevasta termistä. Xenonmyrkytys

lasketaan keskimääräisen neutronitehon funktiona, ja xenon-transientti voidaan haluttaessa nopeuttaa 20- tai 200-kertaiseksi.

Reaktorisydämen lämmönsiirto on kuvattu osittaisdifferentiaaliyhtälöillä ajan ja aksiaalisen paikkakoordinaatin suhteen. Tehon on oletettu vapautuvan kokonaan polttoaineessa, ja polttoaineen lämpötila on korvattu sauvan poikkileikkauksen yli otetulla keskiarvolla. Lämmönsiirtokerroin polttoaineesta suojakuoreen on oletettu vakioksi. Lämmönsiirto suojakuoresta veteen lasketaan joko konvektiivisen lämmönsiirron tai kuplakiehunnan korrelaatiosta. Näiden rajakohta määräytyy siitä, kumpi antaa pienemmän arvon suojakuoren lämpötilalle. Virtausta tarkastellaan erottuneena 2-faasivirtauksena veden saavutettua kyllästyslämpötilan ja 1-faasivirtauksena tämän alapuolella. Kiehuntaa alijäähtyneellä alueella ei oteta huomioon. Lämmönsiirtoyhtälöiden ratkaisu antaa suojakuoren ja veden lämpötilajakautumat sekä aukko-osuusjakautuman paikan ja ajan funktiona.

Syöttöveden oletetaan sekoittuvan täydellisesti sisääntulokohtassa kyllästyslämpötilassa olevaan veteen, minkä jälkeen vesi etenee tulppavirtauksena alastulorenkaassa. Reaktorin alaosassa oletetaan täydellinen sekoittuminen. Reaktorisydämessä virtaa virtauskanavien ohi 10 %. Alastulorenkaassa ja kanavien ohi tapahtuvassa virtauksessa esiintyy pääkiertovirtauksen nopeudesta riippuva viive, ja syöttövesiputkissa syöttövesivirtauksesta riippuva viive. Nämä muodostetaan digitaalikoneessa.

Pääkiertopumput on kuvattu epälineaarilla mallilla, johon sisältyy pumpun ominaisuuskäyrä ja kiertopiirin painehäviö virtauksen funktiona. Painehäviökäyrä on sovitettu niin, että luonnonkierto on n. 30 % nimellisarvosta. Yksi pumppu voidaan pysäyttää erikseen, ja sen massavirta on sisäänmenosuure muiden pumppujen systeemille.

Syöttövesipiirissä oletetaan paine korkeapainepumppujen imupuolella vakioksi. Pumput on kuvattu samalla periaatteella kuin pääkiertopumputkin. Painehäviö korkeapaine-esilämmittimissä ja niitä seuraavissa kahdessa rinnakkaisessa syöttövesiventtiilissä on verrannollinen virtauksen neliöön, ja vastuskerroin riippuu venttiilien avautumasta. Venttiileistä suurempi menee kiinni höyry- ja syöttövesivirran alittaessa 30 % ja avautuu, kun toinen näistä ylittää 40 %. Pienempi venttiili on säädettävä, kun virtaus on alle 40 %, ja kokonaan auki tämän yläpuolella.

Reaktorin pinnankorkeus lasketaan paineastian sisältämän veden massasta, jonka muutosnopeus saadaan syöttövesivirran ja höyryvirran erotuksesta. Lisäksi

otetaan huomioon reaktorisydämen höyrytilavuus, joka varsinkin pikasulun yhteydessä muuttuu huomattavasti.

Paine lasketaan olettaen paineastian yläosassa vallitsevan kyllästystilan, jolloin paineen ja höyryn tiheyden välillä on yksikäsitteinen riippuvuus. Tiheyden laskemiseen tarvitaan höyryn tilavuus ja massa. Massan muutosnopeus saadaan reaktorisydäimestä tulevan höyryvirran ja venttiilien läpi menevän höyryvirran erotuksesta. Höyrytilavuuteen sisältyy myös turbiinille menevien höyryputkien tilavuus. Paine reaktorisydämessä saadaan lisäämällä laskettuun paineen arvoon pääkiertopumpuissa tapahtuva paineennousu.

Turbiinin säätöventtiilin ja ohitusventtiilin kuvaukset ovat epälineaariset. Ne on toteutettu analogiakoneessa.

Turbiinin korkeapaineosa ja matalapaineosa on kuvattu kumpikin yhdellä aikavakiolla, joiden lisäksi mukana on välitulistimen aikavakio. Turbiinin hyötysuhteen epälineaarisuus on otettu huomioon siten, että osa nimellishöyryvirrasta tarvitaan häviöiden kompensointiin, ja mekaaninen teho on suoraan verrannollinen höyryvirran ja tämän minimihöyryvirran erotukseen.

Syöttöveden esilämmitys on kuvattu siten, että paine viimeisen esilämmitysasteen höyrypuolella oletetaan suoraan verrannolliseksi turbiinin tehoon, ja lämpötila on tätä painetta vastaava kyllästyslämpötila. Syöttöveden lämpötila seuraa tästä muutamaa astetta alemmaa referenssilämpötilaa tietyllä aikavakiolla.

Generaattori on kuvattu heilahteluyhtälöllä tilanteessa, jossa se syöttää jännitteeltään jäykkää verkkoa siirtojohdon välityksellä. Yksinkertaistettuun verkkomalliin on liitetty myös verkon keskussäätäjän kuvaus.

Simulointimalli sisältää myös pääsäätojärjestelmien sekä rajoitus- ja suojausysteemien kuvaukset.

6.2 Ohjelmointiperiaatteet

Laskennan aikana analogiakone on jaettu kahteen osaan. Nopea osa (aikavakio 1 millisekunti) toimii digitaalikoneen analogia-aliohjelmana ratkaistaessa reaktorisydämen lämpötila- ja aukko-osuusprofiileja. Muu osa analogiakoneesta toimii hitaammalla aika-alueella (aikavakio 1 sek.). Digitaalikoneessa lasketaan neutronikinetiikka ja siihen liittyvät takaisinkytkennät, säätösauvojen liikkuminen, xenonmyrkytys, paine, viiveet, esilämmitys, suurin osa suojaussysteemistä, sekä muita pienempiä yksityiskohtia. Analogiakoneeseen on ohjelmoitu mm. turbiini, generaattori, verkko, pumput ja säätösystemit.

8.7 LÄHDELUETTELO

- 1 Haapanen, P., Juusela, A., Lilja, R. & Välimäki, S., A nonlinear hybrid computer simulation model of a PWR nuclear power plant, VTT/SÄH, tiedonanto 6, 1974, 83s. + liitt. 39s.
- 2 Juusela, A. & Juslin, K., A nonlinear simulation model of a BWR nuclear power plant, VTT/SÄH, tiedonanto 20, 1976, 48s. + liitt. 39s.
- 3 Juusela, A., Kiehutusvesiydinvoimalaitoksen tosiaikainen simulointimalli ja sen toteutus hybridikoneella, TKK/F, lisenssiaattityö, 1978, 73s. + liitt. 2s.
- 4 Winter, M., Vuorenmaa, A. & Haapanen, P., Use of a simulation model for the Loviisa nuclear power plant control system development and commissioning, Enlarged Halden Programme Group Meeting, Fredrikstad 1977, 12s.

9. DIGITAALISIMULAATTORIT (TIIVISTELMÄ)

1. SIMULAATTORITYYPIT	3
2. SIMULAATTORIEN MERKITYS JA KÄYTTÖ	3
3. SIMULOINNIN LAAJUUS JA SIMULOINTIMALLIT	3
4. TIETOKONELAITTEISTO	5
5. OHJELMISTO	5
6. SIMULAATTORIPROJEKTIN TOTEUTUS	5
7. SIMULAATTORIEN KEHITYSNÄKYMIÄ	5

DIGITAALISIMULAATTORIT (Tiivistelmä)

1

Simulaattorityypit

Laajat, täysimittakaavaiset ydinvoimalaitossimulaattorit on nykyään poikkeuksetta toteutettu digitaalisia tietokoneita käyttäen. Aikaisemmin käytössä olleet analogia- ja hybridilaitteistot eivät enää sovellu simuloinnin laajuuden ja käyttötehokkuuden kasvaneiden vaatimusten vuoksi tähän tarkoitukseen. Suurten ydinvoimalaitossimulaattoreiden pääasiallinen käyttötarkoitus on käyttöhenkilökunnan koulutus. Käyttötarkoitus vaikuttaa voimakkaasti teknisiin ratkaisuihin ja erottaa koulutussimulaattorit muista ydinvoimalaitosten prosesseja tai osia simuloivista tietokoneohjelmista ja laitteistoista.

2

Simulaattorien merkitys ja käyttö

Suuria koulutussimulaattoreita on tällä hetkellä käytössä n. 40 ja tilattuna n. 50. Niitä pidetään koulutuksen korvaamattomina apuvälineinä. Koulutuksen ohella niitä käytetään myös rajoitetusti tutkimuskäyttöön ennen kaikkea valvomotekniikan eri osa-alueilla. Koulutussimulaattoreille asetetaan USA:ssa viralliset laatuvaatimukset, jotka edellyttävät erittäin suurta yhtäläisyyttä simulaattorin ja simuloitavan laitoksen välillä.

3

Simuloinnin laajuus ja simulointimallit

Moderneissa koulutussimulaattoreissa kaikki energian tuotannon ja turvallisuuden kannalta oléelliset järjestelmät on simuloitu. Käyttötarkoituksen mukaisesti suoritetaan kuitenkin yksinkertaistuksia. Simulointimallit perustuvat fysikaalisiin perusyhtälöihin.

Suurille simulaattoreille on tyypillistä fyysikaltaan yksinkertaisten teknisten järjestelmien mallien runsaus. Nämä vaativat jopa enemmän resursseja kuin pääkomponentit (reaktori, prim. piiri, höyrystin, turbiini jne.). Näiden järjestelmien simuloinnissa pyritään soveltamaan pitkälle kehitettyjä standardimenetelmiä. Vikatilanteiden simuloinnilla on koulutuksen kannalta keskeinen merkitys ja se perustuu pääosaltaan fysikkaalisiin malleihin. Suurten vuotojen simulointiin käytetään kuitenkin osittain ei-fysikaalisia malleja.

J SAASTANDINEN/RK

18.01.1982

**NUCLEAR POWER PLANT FULL-SCOPE OPERATOR TRAINING
 SIMULATORS IN OPERATION OR IN ORDER**
STATUS IN THE END OF 1981

AREA	IN OPERATION	ON ORDER	TOTAL
USA	19	32	51
CANADA	1	4	5
WEST EUROPE	13	6	19
ASIA	6	2	8
EAST EUROPE	2	3	5
AFRICA	-	1	1
<hr/>			
TOTAL	41	48	89

J Karppinen/ur

25.03.1982

9-5

4
Tietokonelaitteisto

Tyypillinen tietokonelaitteisto koostuu useammasta tehokkaasta "super-mini"-tietokoneesta jotka vaihtavat tietoja yhteisen moniporttimuistin kautta. Voimalaitostietokoneen kopio voi olla sellaisenaan yhdistettynä simulaattoritietokoneisiin tai sen toiminnot voidaan simuloida muilla tietokoneilla.

5
Ohjelmisto

Ohjelmistosta huomattavan osan muodostavat muut kuin itse laitosta simuloivat ohjelmat. Tällaisia ovat erilaiset I/O ohjelmat ja simulaattorin hallintaohjelmat. Simulaattorin kehittäminen ja ylläpito vaativat myös runsaasti apuohjelmia. Itse ydinvoimalaitosta simuloivat ohjelmat, malliohjelmat, on toteutettu voimakkaan modulaarisesti. Ne suoritetaan pääsääntöisesti kiinteässä järjestyksessä, joka vastaa informaation kulun luontaista virtaa itse laitoksella. Ohjelmiston eräänä kulmakivenä on tehokas tietokantajärjestelmä, joka sitoo myös apu- ja malliohjelmat toisiinsa.

6
Simulaattoriprojektin toteutus

Modernin koulutussimulaattorin rakentaminen vaatii monen kymmenen miestyövuoden työpanoksen tyypillisesti noin kolmen vuoden toteutusaikana. Oleellinen osa työstä kuuluu kokonaisjärjestelmän yhteensovittamiseen ja testaukseen. Järjestelmän monimutkaisuuden vuoksi testauksessa on mahdollista kattaa kuitenkin vain murto-osa mahdollisista ajotilanteista. Simulaattorit vaativatkin tyypillisesti kohtuullisesti jälkihoitoa, jota aiheuttaa myös itse laitoksella suoritettujen muutosten huomiointi simulaattorilla.

7
Simulaattorien kehitysnäkymiä

Simulaattorien asema vahvistuu ja käyttö laajenee entisestäänkin. Laitosspesifiset, laitospaikalle sijoitetut simulaattorit muodostuvat vallitseviksi. Simulaattoreille asetettavat vaatimukset kasvavat nopeasti ja simulaattorit tulevat entistä täydellisemmiksi. Simulaattoreiden käyttö tutkimustarkoituksiin lisääntyy ja erityisiä "analyysisimulaattoreita" tullaan rakentamaan. Laitteistoratkaisuissa erityisprosessorit ja hajautettu, rinnakkainen prosessointi yleistyvät. Standardi- ja apuohjelmien käyttö ja merkitys lisääntyvät.

10.	REAKTORIN AIKA-PAIKKA SÄÄTÖ (TIIVISTELMÄ)	
1.	MIKSI TEHONJAKAUTUMAN SÄÄTÖÄ TARVITAAN	3
2.	XENON DYNAMIIKKA JA SÄÄTÖ	3
3.	TEHONJAKAUTUMAN SÄÄTÖ ERI REAKTORITYYPEISSÄ	3
4.	KÄYTÄNNÖN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄ (KWU)	5
5.	TEHONJAKAUTUMAN SÄÄTÖ OPTIMISÄÄTÖONGELMANA	5
6.	OPTIMISÄÄTÖONGELMAN RATKAISUMENETELMIÄ	5
	KIRJALLISUUSVIITTEITÄ	7

REAKTORIN AIKA-PAIKKA SÄÄTÖ (TIIVISTELMÄ)

1

Miksi tehonjakautuman säätöä tarvitaan

Ydinpolttoaineen lämpöteknisen ja mekaanisen kestävyuden kannalta rajoittavia tekijöitä ovat polttoainetablettien keskustan lämpötila, polttoaineen ja suojakuoren mekaaninen vuorovaikutus ja lämmönsiirron tehokkuus jäähtyttyeseen. Näiden pitämiseksi suunnittelurajoissa ja reaktorin joustavan toiminnan varmistamiseksi tarvitaan tehonjakautuman säätöä. Suurissa reaktoreissa, jotka toimivat vaihtelevalla kuormituksella tarve on erityisen suuri.

2

Xenon dynamiikka ja säätö

Tehonjakautuman säätö liittyy käytännössä reaktiivisuuden (tehon) säätöön. Reaktiivisuuden säätö aiheuttaa tehonjakautumaan häiriöitä, jotka voivat synnyttää n.k. xenon-värähtelyä. Nämä värähtelyt ovat melko hitaita (periodi n. 20 h), mutta ne voivat suurissa reaktoreissa olla kasvavia (epästabiileja) ja vaativat säätöä. Reaktorin stabiilisuus Xe-värähtelyjen suhteen pienenee sen koon kasvaessa, tehotiheyden noustessa, tehonjakautuman tullessa tasaisemmaksi ja termisten takaisinkytkentöjen heiketessä. Useat näistä ovat muista syistä tavoiteltavia piirteitä. Tehonjakautumaefektit joudutaan huomioimaan myös suunniteltaessa säätöelementtejä, latauskaavioita ja palamastrategiaa.

3

Tehonjakautuman säätö eri reaktorityypeissä

Tehonjakautuman värähtelyt voidaan jakaa aksiaaliin, radiaaliin ja azimutaaleihin moodeihin. Suurissa kaasujäähtynteisissä reaktoreissa esiintyy azimutaalisia värähtelyjä, jotka säädetään sektoreittain toimivien erillisten säätöpiirien avulla. Raskasvesireaktoreissa esiintyy useampia epästabiileja värähtelymoodeja ja niitä varten on kehitetty erityisiä paikallisia säätöelementtejä käyttäviä tietokonesäätömenetelmiä. Kiehumusvesireaktoreissa tehonjakautuman globaalit värähtelyt ovat vahvasti stabiileja, mutta paikalliset efektit vaativat huomiota. Painevesireaktoreissa voi esiintyä epästabiileja aksiaalisia värähtelyjä ja jossakin määrin azimutaalisia värähtelyjä, joihin on varauduttava nykyistä suuremmissa reaktoreissa.

J Karppinen/ur

29.04.1982

10-5

4

Käytännön säätöjärjestelmä (KWU)

KWU:n suurissa painevesireaktoreissa on erittäin pitkälle kehitetty automaattinen tehonjakautuman säätö- ja rajoitusjärjestelmä. Koko reaktorin ohjausjärjestelmä jakautuu kolmelle hierarkkiselle tasolle: säätöön, rajoitukseen ja suojaukseen. Myös tehonjakautuman hallinta on jaettu näille kolmelle tasolle.

5

Tehonjakautuman säätö optimisäätöongelmana

Reaktorin reaktiivisuuden ja tehonjakautuman säädön tarkastelu monimuuttuja-optimisäätöongelmana tarjoaa myös käytännön säätöongelmien ratkaisun kannalta oleellisen tärkeitä piirteitä, joita ei tavanomaisilla menetelmillä voida huomioida. Tällaisia piirteitä ovat: eri osien vuorovaikutusten huomiointi, ennakoivan säädön mahdollisuus ja erilaisten rajoitusten huomiointi. Toisaalta probleeman kattava määrittely ja numeerinen ratkaisu ovat vaikeita tehtäviä.

6

Optimisäätöongelman ratkaisumenetelmiä

Eri tavoin määriteltäisiin tehonjakautumansäätöongelmiin on sovellettu monia ratkaisumenetelmiä kuten variaatiolaskentaa, Pontryaginin Maksimiperiaatetta, dynaamista ohjelmointia, matemaattista ohjelmointia ja LQG-säätöteoriaa.

Eräs esimerkki matemaattisen ohjelmoinnin soveltuksesta on MMP (Multistage Mathematical Programming) menetelmä. Se on antanut hyviä tuloksia myös vaikeissa kolmidimensioisissa ongelmissa, joissa erilaisia rajoituksia niin säädön kuin tilankin suhteen on otettu huomioon.

Matemaattisen ratkaisun kannalta MMP:tä tehokkaampia ovat hajautettua, hierarkkista, monitasoista optimointia soveltavat menetelmät, joita aivan viime aikoina on kehitetty. Näitä ovat MCCS (Multilevel Core Control System) ja COMET (Hierarchical Costate Co-ordination Method for Core Control). Näiden menetelmien käyttöönottoa suunnitellaan prediktiivisten reaktorisydämen valvontajärjestelmien yhteydessä.

J Karppinen/ur

29.04.1982

10-7

Kirjallisuusviitteitä:

- 1 W.M. Stacey: "Space-Time Nuclear Reactor Kinetics", Academic Press, New York, 1969.
- 2 Proc. of IAEA Specialists Meeting: "Spatial Control Problems", AE-RF-75-3125, Ab Atomenergi (1975)
- 3 J. Karppinen: "Spatial Reactor Control Methods" Nuclear Science and Engineering, 64, 657-672 (1977)
- 4 J Karppinen et.al.: "Core Control Optimization for Scheduled Load Changes in Large Pressurized Water Reactors", Nuclear Science and Engineering, 71, 1-17, (1979)
- 5 D. Beraha, J. Karppinen: "Power Distribution Control by Hierarchical Optimization Techniques", Proc. ANS/ENS Mtg. Advances in Math. Methods for the Solution of Nucl. Eng. Probl., Munich, Fed. Rep. of Germany, April 1981

Altti Lucander

1982-04-22

SISÄLTÖ

12. TVO I/II -LAITOKSIEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄT

Kiehutusvesilaitoksen höyrykiertoprosessi	3
Kiehutusvesilaitoksen pääsäättöjärjestelmät	3
Säättöjärjestelmien toteutus ja suoritusarvot	5
Sähkötehon säätö	
Raktorin paineen säätö	
Rajoituksia säädettävyydelle	11



12.10.1981

TVO I/II -LAITOKSIEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄT

Kiehutusvesilaitoksen höyrynkiertoprosessi

Kiehutusvesireaktorilaitoksen höyrynkiertoprosessi on yksinkertaistettuna kuvan 1 mukainen. Reaktorissa kehitetty höyry johdatetaan turpiinin läpi, lauhdutetaan lauhduttimessa, puhdistetaan, esilämmitetään ja palautetaan takaisin reaktoriin. TVO:n 660 MW laitoksissa massavirtaukset tässä kiertoprosessissa ovat 1000 kg/s luokkaa.

Kiehutusvesilaitoksen pääsääntöjärjestelmät

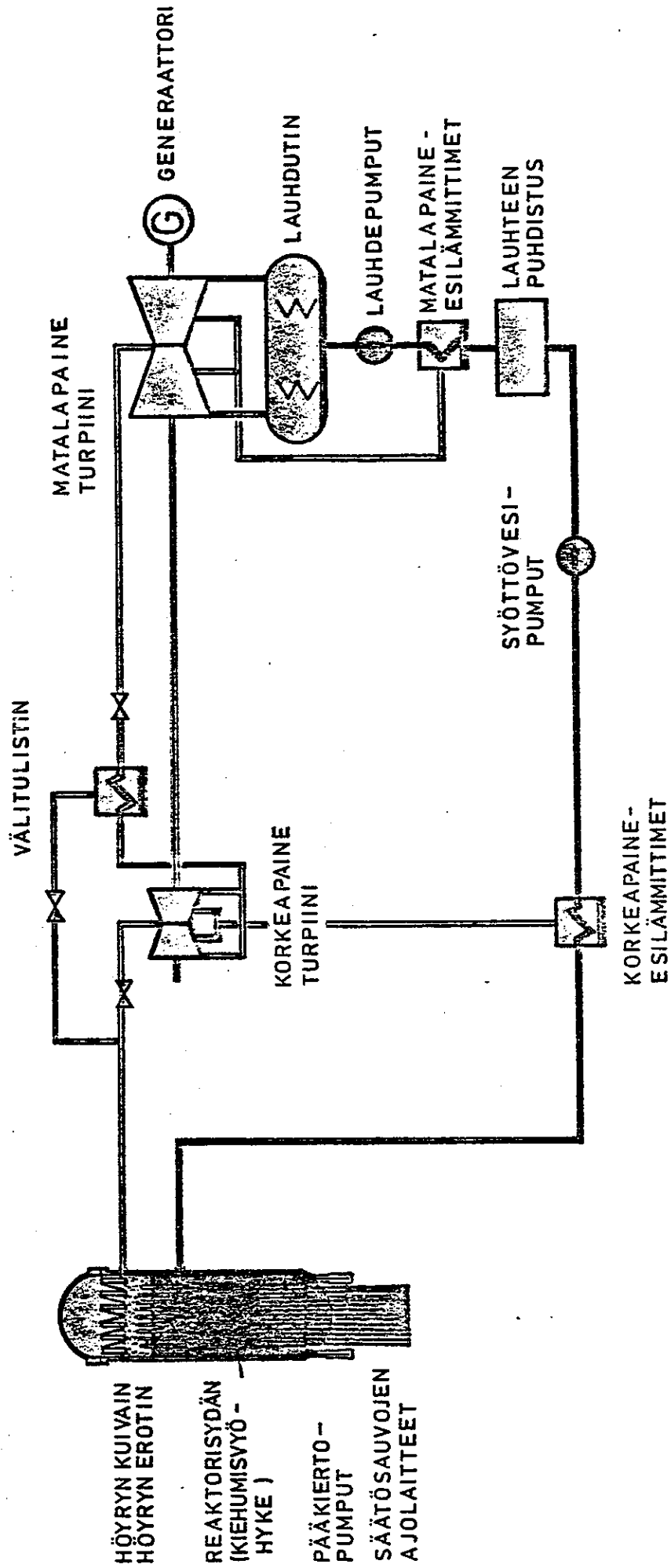
Kuvassa 2 on esitetty kiehutusvesilaitoksen kolme pääsääntöjärjestelmää, jotka ovat tehonsäätö, paineensäätö ja reaktorin pinnan säätö. Parametrit, jotka näissä säätöpiireissä säätötoimintaan vaikuttavat, ovat

- pääkiertovirtaus
- reaktorin pinta
- reaktorin paine
- syöttöveden virtausmäärä
- höyryn virtausmäärä
- reaktorisydämessä vallitseva neutronivuo
- generaattorin sähköteho
- verkon taajuus
- turpiinin kierrosluku ja kiihtyvyyys
- säätösauvojen asento reaktorisydämessä

Konventionaalisissa höyryvoimalaitoksissa sähkötehoa usein säädetään turpiinin höyryventtiileillä. Tällöin höyrykehitysjärjestelmää säädetään turpiinin orjana. Kiehutusvesilaitoksessa periaate on päinvastainen. Normaalisissa käyttötilanteissa laitoksen verkkoon antamaa tehoa säädetään reaktorin höyrykehitystä säätämällä.

TURPIINILAITOS

REAKTORILAITOS



12.10.81

Turpiinilaitos toimii reaktorin orjana turpiinilaitoksen höyrynsäätöventtiilien säätäessä turpiinin läpi kulkevaa höyryvirtaa siten, että reaktorin paine pysyy suurella tarkkuudella vakiona.

Reaktorin pintasäätäjä pitää reaktorin vesipintaa normaaliajossa vakiona suurella tarkkuudella säätämällä reaktoriin pumpattavaa syöttövettä reaktorin kulloistakin höyrykehitystä vastaten. Tehoalueella syöttövesivirtausta säädetään muuttamalla nestekytkimien avulla syöttövesipumppujen kierroslukua.

Säätöjärjestelmien toteutus ja suoritusarvot

Sähkötehon säätö

Laitoksen tehonsäätöjärjestelmä voidaan esittää kuvan 3 mukaisena lohkokaaaviona.

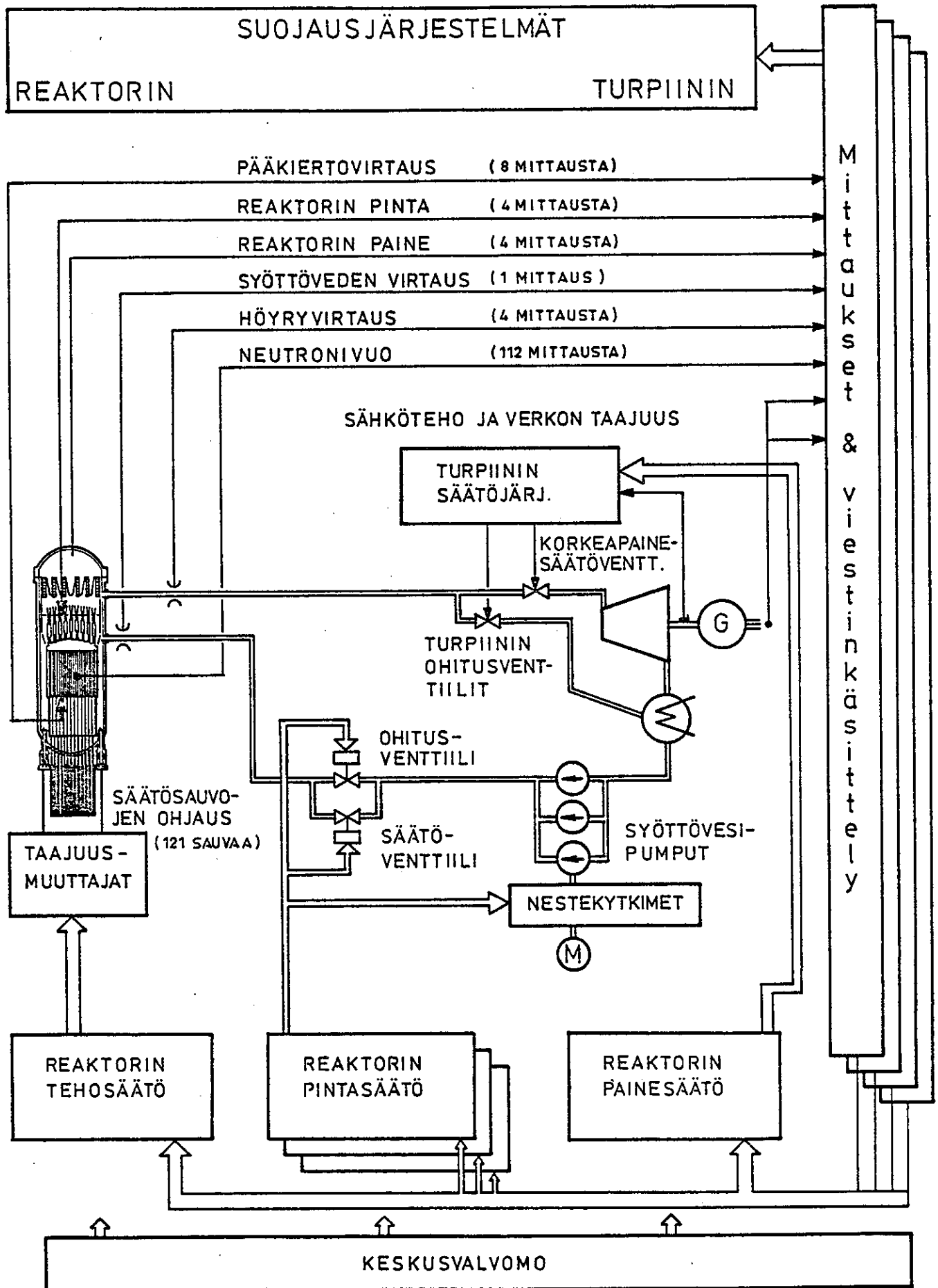
Reaktorin kehittämään termiseen tehoon voidaan vaikuttaa kahdella tavalla; ohjaamalla reaktori sydämeen työnnettäviä säätösauvoja tai säätämällä sydämen läpi kulkevan jäähdytevesivirtauksen määrää. Toimittaessa yli 65 % teholla sähkötehoa säädetään pääkiertopumppujen kierroslukua muuttamalla. Säätösauvat ovat vakioasennoissa, joita muutetaan vain polttoaineen palaman kompensointiin tarvittavissa määrin.

Tehon pääsäättäjän muodostaa neutronivuon säätäjä, laitostehon säätäjä, asetusrvoyksiköt ja logiikkayksikkö.

Toteuttavat säätäjät käsittävät kuuden pääkiertopumpun kierrosluvun kohdesäätäjät. Nämä ovat staattisia taajuusmuuttajia, jotka kukin ohjaavat 600 kW 1500 r/min asynkronimoottoria säätöalueen ollessa 1 : 5. Massavirta täydellä teholla on noin 7000 kg/s.

TVOI/II BWR-LAITOKSEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄT

AA /TVO.





12.10.1981

Kiehumusvesireaktori on dynamiikaltaan erittäin nopea. Kiertopumppujen massa on pieni suhteessa säätövoimaan ja neutronivuomittarit reagoivat erittäin nopeasti reaktoritehon muutoksiin.

Neutronivuosaattaja vastaa säätöpiirin dynamiikasta. Siihen rakennetut neutronitehon rajoittimet estävät tehon nousun yli lisensoidun 100 % tehon.

Tehon ja jaksoluvun mittausarvot saadaan generaattorin navoilta. Tehonsäätäjä ohjaa neutronivuon säätäjän asetusarvoa. Neutronivuo mitataan reaktorisydämessä 112 pisteessä. Näistä muodostetaan 4 keskiarvoa, joiden keskiarvo puolestaan viedään vuosäätäjälle mittausarvoksi. Vuosäätäjä vertaa mitattua vuon arvoa tehosaätäjän antamaan asetusarvoon ja muodostaa kierroslukusaätäjälle asetusarvon.

Laitoksen tehonsäädön nopeus kiertopumpuilla on 20 %/min kulloinkin käytetyn tehoalueen ylärajasta. Tehoalueen leveys on > 30 % kulloisestakin ylärajasta. Tyyppiarvoja alueista ja säätönopeuksista ovat:

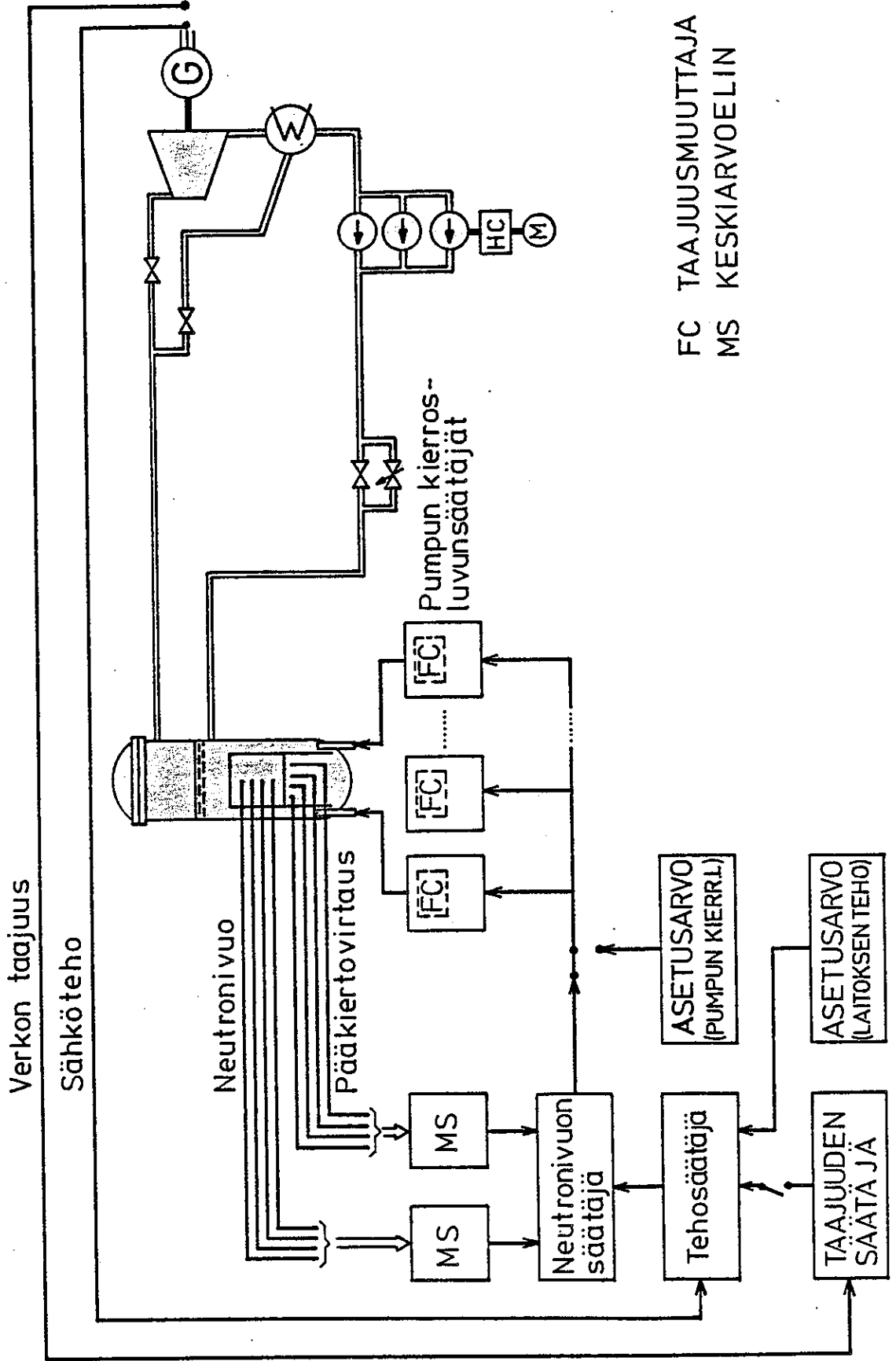
tehoalue	muutosnopeus
100 - 70 %	20 %/min
80 - 56 %	16 %/min
60 - 42 %	12 %/min

Tehosäädön nopeusrajoitukset on viritetty pumppujen kierroslukusaätimiin normaaliajaja varten. Laitoksen häiriötilanteissa reaktorin tai turpiinin suojausjärjestelmiltä saatavat logiikkaviestit voivat ohjata pääkiertopumppujen kierroslukuja alas suuremalla nopeudella häiriön lieventämiseksi ja reaktorin pikasulun välttämiseksi.

REAKTORIN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄ 535

AA / TVO

12-8



FC TAAJUUSMUUTTAJA
MS KESKIVARVOELIN

KUVA 3



12.10.1981

Kuvassa 4 on laitoksen koekäyttövaiheen aikana mitattu laitoksen vaste-tehon asetusarvomuutokselle. Käyrästä käy ilmi, että laitosteho seuraa asetusarvomuutosta hyvin noin 15 s aikavakiolla.

Laitoksella voidaan myös aikaansaada 5 % askelmainen tehomuutos 15 s aikaväkiolla.

Reaktorin paineen säätö

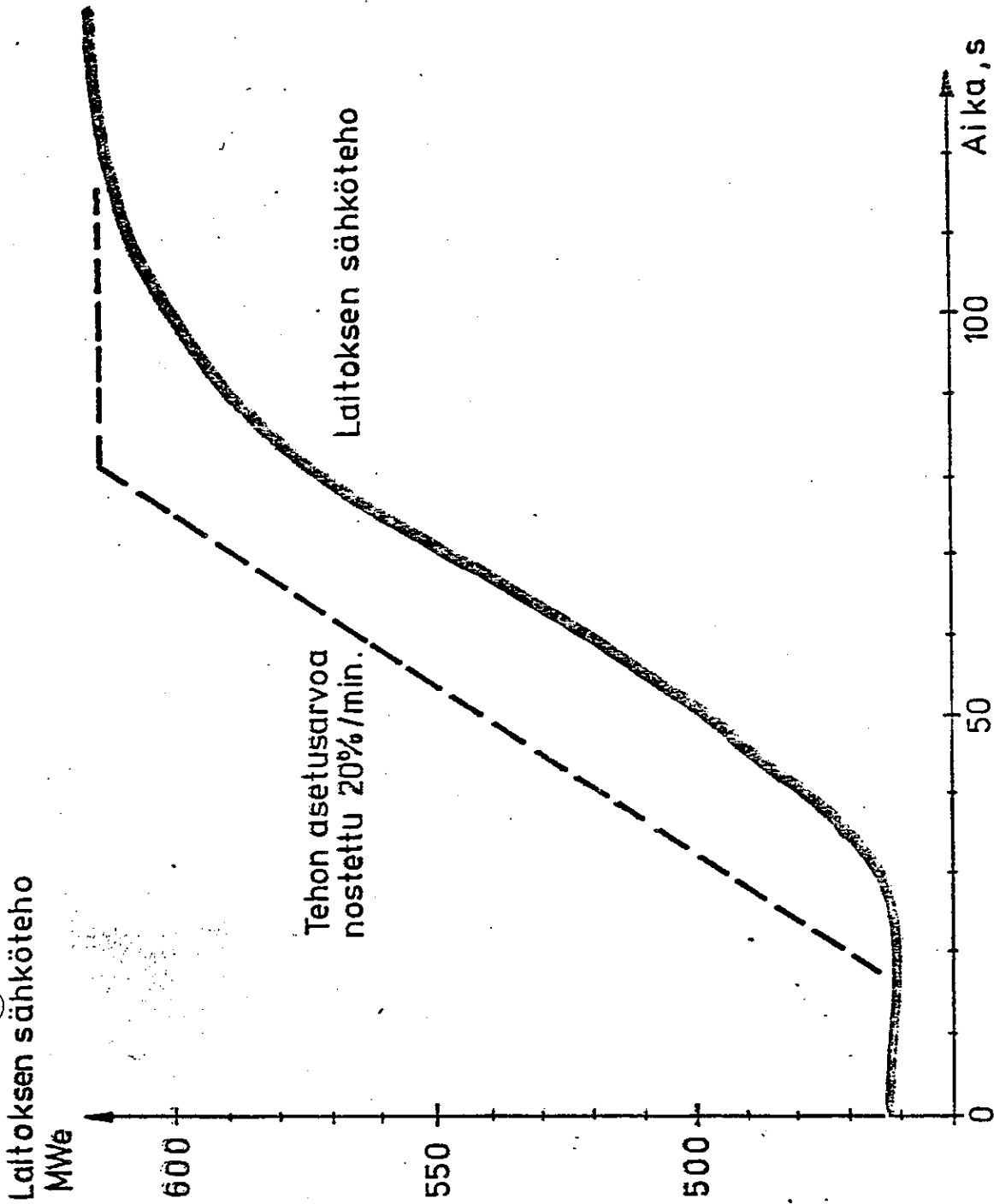
Reaktorin paineen säädön periaate käy ilmi kuvasta 5. Painesäätäjä saa mittausarvonsa neljän painemittauksen keskiarvona. Koska neutronivuon muutos on verannollinen paineen derivaattaan, säätäjän dynamiikkaa parannetaan kytkemällä neutronivuon keskiarvo painesäätimelle.

Turpiiniventtiilien toimilaitteet ja säätöreleet ovat hydraulisia. Hydrauliikkajärjestelmässä painesäätimien ulostuloviesti jaetaan siten, että säätöventtiilin ja ohitusventtiilin yhteinen höyrykapasiteetti vastaa painesäätimen antamaa käskyarvoa.

Normaalilla tehoajolla ohitusventtiili on kiinni ja paineen säätö tapahtuu päähöyryventtiilillä.

Häiriötilanteissa kierroslukusäätäjä ja kiihtyvyyden rajoitin puuttuvat säätöön ja sulkevat pääsäätöventtiiliä. Tällöin ohitusventtiilin avautuminen pitää reaktoripainetta vakiona.

Turpiinin kuormitusautomaattikka alemmilla tehoilla ajettaessa vaikuttaa ohitusventtiilien avautumiseen.



12.10.1981

Reaktorin vesipinnan säätö (syöttöveden määrän säätö)

Järjestelmään, kuva 6, kuuluu pääsäättäjä, neljä syöttövesipumppujen kierroslukusäättäjä ja yksi syöttövesiventtiilin säätäjä. Pääsäättäjä muodostuu 3-kanavaisesta pinnankorkeuden säätäjästä ja yhteisestä virtausyksiköstä, jotka kokonaisuutena muodostavat 3-pistesäädön.

Pääsäättäjästä saadaan kolme ulostuloviestiä. Näistä muodostetaan neljä keskiarvoa kunkin pumpun kierroslukusäätimen asetusarvoksi sekä venttiilisäätäjän asetusarvoksi.

Pumppujen kierroslukua ohjataan nestekytkimillä.

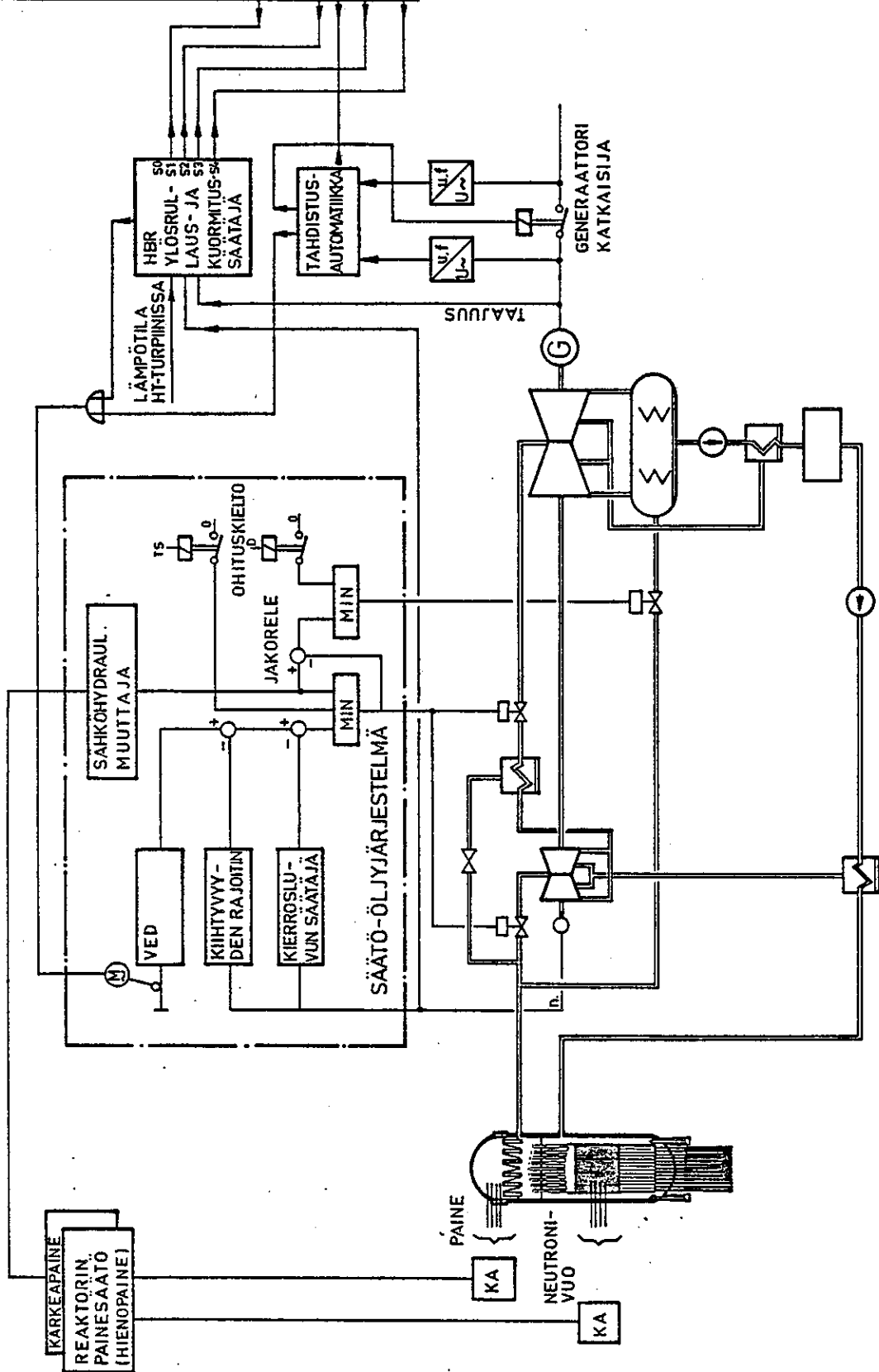
Rajoituksia säädettävyydelle

Vaikkakin kehittynyt tehonsäätöjärjestelmä samoin kuin nopeat sisäiset pääkiertopumput mahdollistavat verraten suuret tehonmuutosnopeudet, nykypolven ydinvoimalaitos on luonteeltaan peruskuormalaitos, jonka kohdalla tulee pyrkiä mahdollisimman suureen tehoon ja tasaiseen käyttötapaan muun muassa seuraavista syistä:

1. Tehovaihtelut lisäävät polttoainevaurioiden riskiä.
2. Tehovaihtelut merkitsevät rasitusta itse ydinvoimalaitoskoneistolle.
3. Tehovaihtelujen aikana lisääntyy häiriöriski.

TVO I TURPIINIAUTOMATIikka JA REAKTORIN PAINENSÄÄTÖ

ASKE	VAIHE	TURBOMAT
1	1	VOITELUÖLJY
2	2	PAAKSAUSLAITE
3	3	PAAKSAUS
4	4	JÄÄHDYTY
5	5	LAUHDE
6	6	TYHJÖ
7	7	LÄMMITYS
8	8	TIIVISTEHÖYRY
9	9	KÄYNTIEJEKTORI
10	2	DUMPPAUS
11	3	PIIKA SULKUÖLJYN PAIN
12	4	TYHJÄKÄYNTI
13	4	MAGNETOINTI
14	4	TAHDISTUS
15	5	MINIMITEHO
16	5	TEHOAJO



TVO I REAKTORIN PINNAN SÄÄTÖ

