

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

COM(69) 350 - ANNEXE TECHNIQUE N° 17

Bruxelles, le 30 avril 1969

"ACTIVITÉS FUTURES D'EURATOM"

Annexe technique n° 17

III. 10 TRAVAUX SUR DEMANDE ET CONTRE REMUNÉRATION

- Action technologique dans le cadre de l'assistance aux exploitants de centrales nucléaires
- Propulsion navale nucléaire
- Sources d'énergie pour les stations de mesure océanographiques
- Contribution dans le domaine de la conversion directe
- Développement des caloports

COM(69) 350

ANNEXE TECHNIQUE No 17

III. 10 TRAVAUX SUR DEMANDE ET CONTRE REMUNERATION

- Action technologiques dans le cadre de l'assistance aux exploitants de centrales nucléaires
- Propulsion navale nucléaire
- Sources d'énergie pour les stations de mesure océanographiques
- Contribution dans le domaine de la conversion directe
- Développement des caloducs

ACTIONS TECHNOLOGIQUES DANS LE CADRE DE L'ASSISTANCE AUX EXPLOITANTS
DE CENTRALES NUCLEAIRES

1. BUTS ET MOYENS DE L'ACTIVITE

1.1. Introduction

L'expérience d'exploitation des centrales nucléaires a montré qu'il existe un certain nombre de domaines technologiques qui :

- présentent encore des difficultés majeures pour les exploitants;
- ne sont pas suffisamment traités par les constructeurs soit par la nature des sujets, soit à cause d'intérêt insuffisant de ces firmes (par exemple : marché très limité, difficultés susceptibles de se manifester après la période de garantie);
- ont dans une certaine mesure un caractère "interfilière" et polyvalent;
- se prêtent à des actions mixtes, dont la partie expérimentale de base pourrait être effectuée dans un Centre de recherche, la partie de démonstration auprès de certaines centrales nucléaires.

C'est au cours de réunions dans le cadre de l'action de la Commission d'échange d'expérience avec les exploitants de centrales nucléaires de la Communauté que l'on a retenu quatre domaines techniques, sur lesquels il serait le plus nécessaire de porter un effort de développement.

Une grande partie de ces travaux d'assistance présente un intérêt général et commun; d'autres peuvent être de caractère spécifique intéressant seulement l'exploitant qui les demande. Les modes de financement devront tenir compte de ces deux aspects.

1.2. Description de l'activité

- a) Méthodes et dispositifs d'intervention dans les zones difficilement accessibles - Examens post-irradiatoires

Des arrêts prolongés survenus dans plusieurs centrales en raison des difficultés avec les structures internes auraient pu être considérablement réduits si les moyens d'inspection et d'intervention actuels étaient plus développés. Les examens post-irradiatoires permettent soit la recherche des causes des incidents, soit l'analyse à posteriori des effets des irradiations (corrosion, mesure du taux de combustion, rupture etc.)

Sur la base d'une étude comparative des besoins et matériels déjà existants, il serait nécessaire d'aborder les points suivants :

- Développement des techniques d'examens visuels sous-marins, caméras miniatures de télévision fonctionnant sous flux gamma élevé. Réalisation et essais dans le coeur et la piscine ESSOR.
 - Développement des techniques de métrologie sur matériaux actifs en piscine et cellules (éléments combustibles, barres de contrôle). Mise au point d'appareils correspondants.
 - Métrologie des états de surface en cellule et en piscine; développement des méthodes interférentielles; neutrographie en cellule pour examens non destructifs des structures denses, telles que grappes combustibles; adaptation d'un accélérateur à la cellule ADECO; mise au point du procédé de transfert sur surfaces sensibles.
 - Formation de spécialistes envoyés par les centrales; préparation de stages et cours.
- b) Détection du comportement vibratoire anormal des structures

Des arrêts prolongés de centrales nucléaires se sont produits dans le passé, en raison de graves dommages occasionnés par des vibrations excessives. En conséquence, les exploitants sont soucieux d'étendre leurs moyens de surveillance pour déceler au plus tôt toute modification du comportement des structures (notamment structure des cuves de réacteur, parties internes des turbines).

Ces surveillances pourraient se faire par l'analyse des bruits acoustiques et neutroniques dont les méthodes d'interprétation des résultats sont encore à développer. Il faut également tenir compte de problèmes spécifiques tels que : accessibilité et tenue de l'instrumentation sous rayonnement. Les activités proposées comporteraient :

- Etude théorique et expérimentale de l'influence des vibrations dans des composants de structure sur le bruit acoustique ou neutronique.
 - Etude de la détection des modifications mécaniques dans les structures complexes au moyen de spectres de fréquences - sur des modèles - développement des techniques d'analyse (codes de calculs, appareil SDA, instrumentation); vérification sur des structures ESSOR.
 - L'expérimentation des méthodes préconisées dans une ou plusieurs centrales de la Communauté.
- c) Comportement physico-chimique de l'eau du circuit primaire

L'expérience a montré que des phénomènes de transfert et de dépôt par l'eau primaire peuvent compromettre sérieusement le bon fonctionnement des réacteurs à eau. Les mécanismes fondamentaux sont mal connus.

Les sujets de recherche proposés, par leur nature, dépassent le cadre des possibilités des laboratoires de soutien attachés aux centrales :

- Etude du comportement des produits de corrosion dans l'eau à température élevée jusqu'à 325°C; mesure de la solubilité des différents métaux; examens de la nature et des dimensions des particules en suspension.
- Etude des conditions de formation et précipitation des dépôts, développement des méthodes d'examens de suspension et d'application dans les installations à haute pression.
- Etude thermodynamique, chimique, microscopique et aux rayons X des solutions, des suspensions et des particules
- Développement de méthodes de contrôle continu chimique

d) Codes de calcul pour la gestion du combustible

Dans l'optique d'une autonomie plus grande des exploitants vis-à-vis des fournisseurs, surtout des fournisseurs extra-communautaires, il s'agit d'adapter des codes à des aspects spécifiques d'exploitation des centrales. On peut citer en particulier les points suivants :

- Problèmes de dynamique des réacteurs, notamment le problème du xénon, lié à la réduction des temps de remontée en puissance
- Choix approprié des positions dans lesquelles on doit charger les éléments combustibles frais.

- Détermination d'un "control rod pattern", afin de limiter les inhomogénéités dans les taux de burn up et les distributions de flux en vue d'une utilisation optimale des combustibles.

Ces actions se distinguent par leur spécificité du développement des codes de calcul de caractère plus général qui sont à leur base (voir chapitre 3, point II.3. "gestion du combustible).

2. COMPETENCE ET POTENTIEL DU CCR

Le CCR a déjà en cours des activités dans ces domaines (par exemple examen post-irradiatoire sur les éléments combustibles du SELNI, codes de calcul pour différentes centrales) bien que faute d'une action concertée elles soient jusqu'à présent restées éparpillées et fragmentaires.

Point a) L'ensemble des moyens rattachés au réacteur ESSOR représente sans doute un complexe unique dans la Communauté.

Point b) Il existe au CCR des bancs d'essais, des codes et des méthodes d'analyse des résultats appuyés sur le CETIS. On a en outre développé le Statistical Dynamic Analyser pour la détermination de fonctions de transfert.

Point c) Autoclaves, boucles à eau, laboratoires d'analyse existent. La compétence dans le domaine de l'encrassement par l'organique peut être partiellement transposée à des problèmes homologues concernant l'eau.

Point d) Le développement de différents codes pour les industries a déjà été entrepris dans le passé.

L'effectif nécessaire pour l'exécution de ces actions technologiques dépend de l'importance des demandes. Compte tenu des résultats de réunions de consultations déjà tenues avec les exploitants intéressés, on peut l'évaluer à un ordre de 30 à 40 personnes.

PROPULSION NAVALE NUCLEAIRE

1. But et description de l'activité. Moyens de réalisation

1-A But de l'activité

L'activité proposée comprend une action directe, une action de coordination et une action indirecte (participation aux programmes nationaux).

Les buts de l'action directe sont les suivants:

- constituer un complément aux différents programmes pour la Propulsion Navale Nucléaire qui sont prévus ou sont en cours de développement en Italie (Fiat Nucléaire), en Allemagne (Gesellschaft fuer Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt - GKSS) et aux Pays Bas (Reactor Centrum Nederland - RCN);
- étudier les problèmes d'un caractère et d'un intérêt général pour les réacteurs marins en vue également de leur développement futur.

L'action de coordination concerne la création d'un organisme consultatif pour suivre les travaux et de sous-comités pour l'étude de problèmes généraux (économie, assurances, entrées dans les ports etc...). Cet organisme dont la Commission devrait faire partie ainsi que les représentants de la "Fiat Nucléaire", du CNEN, de la "GKSS" et du "RCN" comprendrait également des Armateurs et des Constructeurs.

L'action indirecte concerne la poursuite de la participation Communautaire à l'exploitation du premier navire européen à propulsion nucléaire, l'"Otto Hahn"; celui-ci a été construit avec la participation financière de la Commission.

Après quelques années (environ trois ans) d'études et de développement, la coopération sera orientée vers un objectif ayant un caractère industriel (p.ex. la construction d'un navire avec des caractéristiques économiques).

1-B Description de l'activité

PHYSIQUE DES REACTEURS (calculs de projet, études expérimentales)

- a) Développement et préparation de codes pour le calcul du burn-up

- Modification du programme "Condor-2" par l'introduction d'un modèle de "burn-up".

- Etude de routines de calcul pour les poisons consommables qui sont déjà disponibles (p.ex. "Cornes", "Ogibo", "Mirage" etc...) en vue d'obtenir une routine généralisée qui puisse être couplée automatiquement aux codes de diffusion-burn-up tels que "Condor", "Erebus", "Triton". Cette routine devrait être finalement couplée à "Condor-2" modifié (version à burn-up ponctuel).

b) Mise au point de bibliothèques de sections efficaces, particulièrement pour les produits de fission

- Cette activité implique une partie expérimentale (mesures par oscillations à exécuter p.ex. dans ECO) et une partie théorique et de calcul pour la mise au point des méthodes d'interprétation.

c) Modification et développement de programmes de calcul pour la sécurité des noyaux

- Emploi et adaptation éventuelle de programmes de calcul déjà développés pour l'analyse des accidents de réactivité (p.ex. éjection rapide d'une barre de contrôle - programmes COSTANZA pour la dynamique spatiale du réacteur) avec calcul de l'ébullition locale et de masse et de son influence sur la réactivité.

- Préparation d'un programme de calcul pour l'étude du surchauffage du coeur pendant l'accident de perte de réfrigérant: un programme d'un caractère général qui étudie la neutronique et l'échange thermique existe déjà (voir point précédent). Il est nécessaire de l'adapter aux modalités de l'accident (différents régimes thermiques pendant l'accident et irradiation des crayons combustibles qui sont mis à nu).

- Préparation d'un programme de calcul pour l'étude des problèmes thermohydrauliques et neutroniques en régime stationnaire et dynamique pour des noyaux à canaux ouverts; il est nécessaire d'établir un modèle propre pour les problèmes thermohydrauliques des canaux ouverts tandis que la partie neutronique déjà existante peut être considérée valide.

d) Blindage

- Préparation d'un programme du type "Monte-Carlo", particulièrement pour l'étude du problème des pénétrations dans les écrans et leur optimisation. Ce type de programme est le seul moyen permettant l'étude de géométries compliquées.

- Achèvement du programme de transport à une dimension "CINNA" pour l'évaluation des spectres neutroniques dans les écrans laminés. Ceci est particulièrement important pour le calcul du "radiation damage" des cuves.

- Etudes expérimentales avec le convertisseur à haut flux "EURACOS" pour des pénétrations rectilignes et en forme de coude et pour des écrans laminés (en particulier pour des écrans eau-fer d'une épaisseur supérieure à 1-1,2 m). Les résultats de ces travaux seraient complémentaires à ceux qui ont été déjà obtenus par la "GKSS" et la "Sorin".

e) Essais d'irradiation

- Détecteurs de flux neutroniques de type spécial (détecteurs au vanadium). Ces essais permettraient la détermination des variations des caractéristiques et de la sensibilité des détecteurs de flux du type coaxial provoquées par des irradiations de longue durée.

- Crayon de B_4C pour barre de contrôle du type à grappe.

ENGINEERING (Etudes expérimentales, méthodes de calcul, essais de composants).

a) Essais de crise thermique pour différentes conditions d'opération

- Essais pour la détermination des conditions de "burn-out" et de "post burn-out" à haute pression (jusqu'à 250 atm) pour différents types d'éléments combustibles.

b) Etudes expérimentales pour l'analyse des phénomènes thermohydrodynamiques provoqués par la perte de réfrigérant

- Etude du comportement thermohydrodynamique d'un canal chauffé en condition de convection forcée, qui est provoquée par la perte du réfrigérant (éjection du réfrigérant).

c) Etude des problèmes du "mixing" d'un écoulement biphasé

- Etude expérimentale du "mixing" en direction transversale pour des éléments combustibles chauffés non uniformément afin d'améliorer les méthodes de calcul existantes.

d) Etudes sur la suppression de la vapeur

- Systèmes de type avancé pour les installations marines; modalités et conséquences de la perte du mélange eau-vapeur.

e) Etudes expérimentales pour évaluer l'efficacité des systèmes

de refroidissement de secours du cœur, du "spray-cooling" et du "flooding" à l'aide d'une grappe de tubes chauffés simulant les crayons combustibles.

f) Essais pour des systèmes de séchage de la vapeur pour échangeurs de chaleur particulièrement pour évaluer les possibilités d'extrapolation de résultats obtenus sur des modèles à échelle réduite.

g) Etudes et essais concernant les structures

- Comportement sous chocs thermiques de structures de type et dimensions différents - étude des effets de l'injection de sécurité ou des accidents.
- Résistance aux ondes de pression et ondes de chocs.
- Préparation de codes et études expérimentales pour les structures complexes (entre autres, études de l'influence des oscillations).
- Naissance et conséquences immédiates d'un accident.
- Essais de photo-élasticité pour les fonds des échangeurs de chaleur, pour les enveloppes sous pression, etc...
- Etudes des vibrations provoquées par l'écoulement du réfrigérant.

h) Effets de la "fretting-corrosion"

- Déterminations expérimentales des amplitudes et fréquences de vibration d'éléments combustibles simulés.
- Essais de "fretting corrosion" avec alliages de Zirconium et Inconel dans l'eau à température élevée avec des fréquences et des amplitudes typiques.

i) Essais de composants et études de fiabilité

- Essais dynamiques d'amortisseurs de différents types et essais du comportement sous irradiation de fluides différents.
- Essais dynamiques d'autres composants (soupapes, clapets, systèmes de blocage mécanique des barres de contrôle etc...).
- Etudes méthodologiques de la fiabilité des systèmes mécaniques des réacteurs.

l) Etudes sur l'application de l'instrumentation fluidique aux réacteurs pour propulsion navale

MATERIAUX

a) Etudes et essais pour les poisons consommables (UB, et oxydes de terres rares)

- Etudes thermodynamiques du comportement des poisons à haute température.

- Etude de la vitesse de diffusion des poisons dans l' UO_2 sous gradient thermique (microsonde).
- Comportement des pastilles d' UO_2 contenant des poisons sous cyclage thermique et comparaison avec pastilles d' UO_2 sans poisons.
- Corrosion de crayons combustibles (UO_2 avec poisons) en présence de "pin-holes" en condition d'opération.
- Essais d'irradiation (en capsules) des pastilles d' UO_2 contenant des poisons à des "burn-up" différents et à des différents gradients thermiques.
- Examen post-irradiation.

b) Etudes et développement des matériaux

- Systèmes de jonction pour matériaux différents (Zr-Acier, Zr-Inconel, etc...) et soudage (p.ex. par explosion).
- Fatigue thermique des matériaux.
- Corrosion sous tension (particulièrement pour les matériaux des tubes des générateurs de vapeur).
- Etude de la friction et de l'usure dans l'eau et dans l'air de matériaux divers en régime de température.
- Fragilisation sous irradiation des matériaux des cuves sous pression (particulièrement pour des matériaux avec caractéristiques avancées à limite élastique élevée).

1-C Moyens de réalisation

Les moyens disponibles à Ispra pour la réalisation du programme proposé sont indiqués ci-dessous:

- Ordinateur électronique "IBM 360/65"
- EURACOS
- Réacteurs ISPRA-1, ESSOR, ECO; laboratoire de moyenne activité - LMA
- Boucle à eau pressurisée (2, 4 MW) pour essais de crise thermique
- Boucle "éjection" (100 MW)
- Boucle "mixing"
- Boucle technologique pour essais d'usure et essais d'endurance dans des combustibles
- Installation "Betulle" pour essais d'éclatement
- Boucle "Sycomore" pour études des composants

- Boucle pour essais thermomécaniques
- Laboratoires de photoélasticité et de jauges des contraintes
- Spectromètre de masse
- Microsonde
- Laboratoires de Métallurgie et Céramique

L'estimation des effectifs nécessaires pour les trois actions proposées est d'une trentaine d'agents.

Le développement général des activités est prévu pour une période d'au moins trois ans, mais évidemment il y a des travaux qui seront terminés dans une période plus brève et d'autres, (comme les essais d'irradiations, matériaux-point a, p.ex.) dont l'exécution sera terminée, peut-être, au delà de trois ans.

Pour la participation à l'exploitation du navire "Otto Hahn" 350.000 U.C. par an (durée de trois ans) seront nécessaires.

2. Motivation technique

La valeur et l'intérêt de l'activité proposée, qui a été établie en accord avec FIAT, GKSS et RCN, doivent être regardés du point de vue d'un développement tant technique qu'industriel et économique. Actuellement, plusieurs études, tant dans la Communauté qu'en Angleterre et aux Etats Unis, ont montré que l'emploi de la puissance nucléaire pour la propulsion des navires est économique, comparé à l'emploi de la puissance conventionnelle, si la puissance demandée est plus grande que 30.000-35.000 CV sur l'arbre. Nous sommes maintenant dans un stade de développement rapide et extraordinairement important des navires "porte-containers" (vitesse jusqu'à 30 noeuds) et des grands et très grands navires pétroliers (200.000-500.000 jusqu'à un million de tonnes de portée en lourd). Ce développement demande des puissances bien supérieures à 25.000 CV sur l'arbre et, comme conséquence, l'emploi de l'énergie nucléaire devient indispensable et inévitable. Il est donc nécessaire non seulement d'aider les Industries et les Organisations qui s'occupent de ces problèmes pour améliorer et développer les réacteurs du type conventionnel, mais de continuer et d'élargir les études dans le domaine des réacteurs plus avancés qui seront employés dans un futur proche pour la propulsion des navires. Il est également nécessaire de tenir compte du développement très rapide des études de nouveaux types de navires (pétroliers et cargos sous-marins, navire composables, très grands "hover-crafts", etc...).

3. Etat de la technique

Les réacteurs construits jusqu'à maintenant sont à eau légère. Les navires existants (à part les sous-marins militaires américains, russes, anglais et français et les navires militaires américains de surface) sont le brise-glace "Lenin", le "Savannah" et le minéralier "Otto Hahn". Les navires dont la construction est décidée ou déjà en cours sont le "coaster" Zan Tahn de la République Chinoise, le navire japonais et le navire italien de support "Enrico Fermi". Les projets et les études exécutés dans le monde et en Europe sont très nombreux. Les connaissances industrielles pour la construction d'un réacteur à eau légère pour la marine marchande (qui sont très développées aux Etats-Unis) existent en Europe surtout en Allemagne (construction du FDR). D'autres Industries, comme la Fiat Nucleare en Italie devront commencer prochainement à construire de tels réacteurs et auront donc besoin d'un support scientifique et technologique.

Pour des réacteurs de propulsion d'un type avancé, des études et des expériences ont été faites en Europe (particulièrement en Allemagne), mais elles ne permettent pas encore de passer à l'étape des réalisations industrielles. C'est un autre secteur de grande importance où un support est indispensable en vue d'une politique industrielle à plus long terme.

4. Encadrement communautaire existant ou prévu

Plusieurs contrats ont été exploités dans le passé par la Commission (p.ex. avec le Reactor Centrum Nederland, la Fiat Nucleare et le CNEN, la GKSS; les deux derniers sont encore en cours).

Actuellement aussi bien l'Italie que l'Allemagne et les Pays-Bas ont en cours des projets nationaux ou des contrats bilatéraux. La continuation de la coopération dans le domaine de la propulsion navale nucléaire par un accord multilatéral et avec coordination des programmes est envisagée par les Organisations précitées.* La Commission (EURATOM) devrait être un des partenaires. La participation aux travaux de la part du C.C.R. a été demandée par les Firmes et les Organisations de ces trois pays.

* Réunion de Bruxelles, le 6 mars 1969, à laquelle les représentants de la FIAT, du RCN et de la GKSS ainsi que les représentants du CNEN (Italie), de la Représentation Permanente Allemande et de la Commission ont participé.

Les actions proposées ont été établies sur la base des conclusions d'une discussion qui a eu lieu à Francfort le 28 mars 1969 entre les représentants de la "FIAT, de la GKSS et de l'RCN". Les sujets retenus sont considérés d'un intérêt commun aux partenaires. Une partie des activités proposées, bien qu'utile et nécessaire pour la propulsion navale nucléaire a été considérée d'intérêt plus général.

Compétence et potentiel d'Ispra

La compétence et le potentiel tant en personnel qualifié qu'en installations, circuits d'essais et équipements ont été vérifiés pendant les discussions pour la préparation de la proposition du programme (voir 1-B et 1-C de la présente note).

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES

SOURCES D'ÉNERGIE POUR LES STATIONS DE MESURE Océanographiques

1. But et description de l'activité. Moyens de réalisation

1-A But de l'activité

L'activité proposée (action directe) a pour but d'étudier le problème des sources d'énergie de longue durée pour l'alimentation d'unités d'instruments installées dans des stations de mesure océanographiques placées dans la mer. Ce problème est important car, bien que en général les puissances soient assez faibles (jusqu'à quelques dizaines de watts), la durée de la génération doit être longue.

1-B Description de l'activité

L'activité proposée est la suivante:

- étudier l'application des batteries isotopiques déjà existantes, ou en cours de développement dans la Communauté, pour l'alimentation des unités modulaires d'instruments contenus dans des bouées (type de batterie, blindage, refroidissement, problèmes d'installation).

1-C Moyens de réalisation

Les effectifs nécessaires sont estimés à 8 agents. Le développement du travail est prévu pour environ deux ans.

2. Motivation technique

Il est proposé par le Groupe spécialisé "Océanographie" du Groupe de travail "Politique de la Recherche Scientifique et Technique", comme quatrième étape d'un programme commun "Réseau de mesure", de faire construire par un consortium européen d'entreprises regroupées un réseau composé par plusieurs stations de mesure automatiques.

La solution proposée permettrait d'éliminer la nécessité, très coûteuse, de changer très souvent (environ chaque 60 jours) les batteries conventionnelles parce que la vie des batteries isotopiques peut être très longue (5 à 10 ans).

3. État de la technique

Aux États Unis les applications des batteries isotopiques sont nombreuses. Dans la Communauté (Institut des Transuraniens de Karlsruhe), on a construit en 1968 la première batterie isotopique (curium 242), cependant l'application n'a pas encore été entreprise.

4. Encadrement Communautaire existant ou prévu

Il est envisagé de conduire cette activité en étroite collaboration avec les Industries Européennes qui construiront les stations automatiques précitées.

5. Compétence et potentiel du C.C.R.

La compétence existe au C.C.R., notamment à Karlsruhe (construction des batteries) et à Ispra (problèmes d'application).

o°o

Contribution dans le domaine de la Conversion Directe

Introduction

Depuis 8 ans le CCR-Ispra a poursuivi ses travaux de base sur le développement des convertisseurs thermo-ioniques et des composantes de réacteurs thermo-ioniques pour l'application spatiale.

Cette activité est reconnue sur le plan international. Rappelons en particulier le rôle joué par le CCR-Ispra dans l'organisation de la conférence de Stresa en mai 1968.

De façon limitée, des études ont également été entreprises sur l'application des radioisotopes à des convertisseurs thermoélectriques.

Une conséquence de ceci est l'existence d'une compétence dans ces domaines et des laboratoires bien équipés pour l'exécution de travaux sur demande de l'extérieur.

Ci-dessous une liste de sujets de recherche susceptibles de faire l'objet de travaux sur demande et contre rémunération :

- 1) Etude de la physique des convertisseurs thermo-ioniques dans le but d'améliorer leur comportement électrique.
- 2) Développement de jonctions métal-céramique pour hautes températures.
- 3) Irradiation de convertisseurs thermo-ioniques et de combustibles nucléaires appropriés.
- 4) Développement de batteries atomiques miniatures en vue de réaliser des donneurs d'impulsions cardiaques (Heart pace makers).
- 5) Développement de générateurs à radioisotopes pour l'application spatiale.
- 6) Etude des sources d'énergie pour coeurs et poumons artificiels.

Une description succincte des points précédents est donnée ci-après :

1) Etude de la physique des convertisseurs thermo-ioniques

Ces études servent à améliorer le comportement électrique des convertisseurs thermo-ioniques et en particulier leur rendement thermique par un approfondissement des connaissances du fonctionnement de ceux-ci. Par l'application de caloducs (heat pipes) il a été possible de construire au CCR des diodes au césium, permettant de mesurer de façon très précise la balance énergétique et le rendement thermique.

Avec un tel dispositif, il est possible d'examiner mieux qu'auparavant l'influence de facteurs tels que les matériaux des électrodes, la présence de petites quantités d'oxygène et l'orientation cristalline de l'émetteur d'électrons.

En plus, des essais ont été faits sur des réservoirs d'absorption du césium, lesquels présentent des avantages notoires par rapport aux réservoirs de césium liquide.

Ces études pourraient s'étendre à la conception de réservoirs d'absorption de césium aptes à être incorporés dans des prototypes de convertisseurs thermo-ioniques.

2) Développement des jonctions métal-céramique

Des jonctions métal-céramique, destinées à des températures supérieures à 1000°C, sont en élaboration, en relation avec le développement de convertisseurs thermo-ioniques munis de caloducs.

Quelques résultats ont déjà été obtenus avec des céramiques métallisées par dépôt en phase vapeur. La jonction céramique-métal s'obtient sous pression (pressure bonding).

Bien que ces travaux, exécutés en collaboration avec la firme allemande Feldmühle, soient les plus avancés d'Europe, il reste toutefois à étudier le comportement en durée de ces jonctions. De plus, on pourrait pousser davantage la température de fonctionnement.

En dehors de ce qui précède, des travaux sont en cours sur des systèmes multicouches métal-céramique-métal, utiles pour la mise en série de plusieurs convertisseurs thermo-ioniques.

3) Irradiation de convertisseurs thermo-ioniques et des combustibles nucléaires appropriés

Une installation de contrôle automatique est disponible au réacteur Ispra-I pour les essais de durée en pile de convertisseurs thermo-ioniques. Leur examen à posteriori dans les cellules chaudes du IMA est également possible.

Il existe aussi une équipe compétente dans la construction de capsules pour l'irradiation de combustibles nucléaires de haute température.

4) Batteries atomiques miniatures

Des donneurs d'impulsions cardiaques (pace makers), complètement incorporés dans le corps humain, présentent des avantages notoires par rapport à ceux partiellement extérieurs. Le radioisotope Pu²³⁸ convient particulièrement bien comme source de chaleur à convertir en pulse électrique (il s'agit de puissances minimales de l'ordre d'une centaine de microwatts). Des études préliminaires ont démontré que les systèmes de conversion thermo-ionique et par thermocouples conviennent bien. Ce domaine nécessite des compétences en mécanique fine et en isolement thermique, lesquelles sont présentes au CCR-Ispra.

.../

5) Développement des générateurs à radioisotopes

Un générateur thermoélectrique avec des éléments de GeSi a été construit et essayé électriquement. La source de chaleur prévue consiste en 40.000 Ci de Tm_{170} , correspondant à 100 watts thermiques. Etant donné la température de sortie élevée (400°C), ce type de générateur conviendrait en principe pour des applications spatiales.

L'expérience acquise dans la construction de tels générateurs et les problèmes de la manipulation de radioisotopes en cellule chaude permet d'accepter des demandes de travaux dans ces domaines.

6) Source d'énergie pour coeurs et poumons artificiels

Des études aux Etats Unis ont démontré que l'adoption de radioisotopes comme source d'énergie ouvre la voie à des coeurs et des poumons artificiels complètement incorporés dans le corps humain. Le problème réside dans la conversion, avec un taux de rendement élevé, de la chaleur en énergie mécanique. Les études préliminaires faites au CCR-Ispra font ressortir l'intérêt du système de conversion dynamique du cycle Sterling (dilatation de gaz chauds) lié à une pompe hydraulique. La construction des modèles s'impose pour pouvoir étudier en pratique la question des pertes d'énergie.

Développement des Caloducs

Introduction

Le caloduc est un système simple de transfert thermique dont la conductivité thermique effective peut être de mille fois supérieure à celle du meilleur conducteur thermique métallique. Au moyen de caloducs, la chaleur peut être transmise pratiquement sans chute de température. En plus, ils permettent de maintenir les températures constantes sans l'utilisation de moyens électriques ou de pièces mobiles.

Le caloduc a été développé dans le passé en relation avec les problèmes de transfert thermique dans les convertisseurs thermoioniques spécialement dans les laboratoires de Los Alamos (USA) et de Ispra. A cause de ses propriétés remarquables, le caloduc commence à devenir intéressant dans beaucoup d'autres domaines. Citons quelques-uns parmi les nombreux domaines d'application du caloduc :

a) Electronique et électrotechnique :

- le refroidissement d'électrodes de gros tubes électroniques
- le refroidissement de systèmes de semi-conducteurs
- le refroidissement de rotors de moteurs ou de génératrices
- le contrôle de température d'un oscillateur ou d'autres systèmes sensibles à la température.

b) Médecine :

- le chauffage ou le refroidissement de régions limitées du corps humain
- le contrôle de la température d'objets de recherche ou de médicaments.

c) Industries :

- le contrôle de la température dans les procédés de fabrication
- l'obtention de températures uniformes dans des fours.

d) Navigation spatiale :

- le contrôle de la température des capsules spatiales
- le transfert thermique à partir d'un réacteur nucléaire vers les convertisseurs thermoélectriques ou thermoioniques
- les radiateurs.

Toutefois, les bases physico-techniques pour ces applications manquent encore partiellement.

2. Etat de la Technique

Des travaux sur les caloducs sont effectués principalement aux Etats Unis, dans la Communauté et depuis la conférence thermo-ionique de Stresa (1968) également en Union Soviétique. En ce qui concerne la recherche de base sur les caloducs, les activités en Europe, dans le passé, étaient presque au même stade que celles conduites aux Etats-Unis. Les travaux sont orientés principalement vers une meilleure compréhension de la physique du caloduc, le développement des caloducs avec un pouvoir de transport de chaleur plus élevé, et vers la solution des problèmes de corrosion à des températures supérieures à 1000°C.

A des températures plus basses, le caloduc est prêt, dans une certaine mesure, pour l'exploitation commerciale. Dans ce domaine les Etats Unis ont une avance importante. La RCA (Lancaster), en particulier, a développé une activité intense (500 caloducs de différents types à l'essai); en 1968 RCA a déjà commercialisé des radiateurs à caloducs pour une meilleure dissipation de la chaleur de klystrons et de dispositifs de semi-conducteurs. Pour le moment il n'existe pas une activité industrielle comparable dans la Communauté. Un certain nombre de firmes s'intéressent aux caloducs mais la plupart n'ont pas encore commencé les travaux expérimentaux, ou leur activité expérimentale est encore très réduite.

3. But et description de l'activité

Les travaux de développement sur demande pourraient avoir les objectifs suivants :

- amélioration des méthodes de calcul des caloducs
- étude de la possibilité de réalisation technologique des caloducs en vue de certaines applications spatiales (et particulièrement en relation avec la construction de radiateurs ultralégers pour les sources d'énergie nucléaire ainsi que le contrôle thermique des capsules spatiales).
- étude de caloducs avancés pouvant fonctionner :
 - a. à de très hautes températures,
 - b. avec des flux de chaleur très élevés,
 - c. avec une stabilité très poussée de la température.

Une description détaillée de ces activités est donnée ci-après :

Amélioration de la méthode de calcul de caloducs

Les limites de rendement des caloducs se calculent actuellement de façon généralement assez imprécise. Il y a trois raisons essentielles à cela :

(1) Pour le calcul du transport maximal de chaleur d'un caloduc il est nécessaire de connaître la dépression en phase vapeur. Son calcul constitue toutefois un problème compliqué et n'a été résolu que dans des cas particulièrement simples. Les données expérimentales qui pourraient contribuer à la base d'une théorie phénoménologique des dépressions manquent en grande partie.

(2) Les données physiques concernant les fluides de travail des caloducs ne sont bien connues que partiellement (par ex. il existe aujourd'hui encore une grosse incertitude au sujet de la solubilité du niobium et du tantale dans les métaux alcalins, qui joue un rôle important dans le comportement en durée de tels caloducs).

(3) L'ébullition dans la structure capillaire limite le taux de chauffage possible des caloducs. Jusqu'à présent on ne dispose que de très peu de mesures sur les limites d'ébullition.

Pour ces raisons les actions suivantes pourraient être entreprises pour l'amélioration des bases de calcul des caloducs :

- théorie des caloducs
- mesure du nombre d'Euler de la vapeur en fonction du nombre de Reynolds et de la géométrie du caloduc
- mesure des limites d'ébullition
- étude des propriétés physiques de liquides pour caloducs.

Examen des possibilités de réalisation technologique de caloducs pour certaines applications de navigation spatiale

Les caloducs présentent, à cause de leur légèreté, un intérêt dans diverses applications de navigation spatiale tel que le refroidissement des collecteurs d'un réacteur thermoionique et l'irradiation de la chaleur dans l'espace; une autre application pourrait avoir pour objet l'égalisation thermique entre les parties d'un satellite exposé au soleil et celles se trouvant à l'ombre.

En ce qui concerne le refroidissement des collecteurs, il est probablement nécessaire de faire fonctionner les caloducs dans des conditions telles que lors de la création d'une bulle de vapeur dans la phase liquide, le fonctionnement devrait s'arrêter. Des caloducs ont déjà fonctionné brièvement dans de telles conditions, sans défaillance. Toutefois, la stabilité temporelle de série de tels caloducs n'a pas encore été étudiée

Dans leur application aux radiateurs, les caloducs reçoivent la chaleur à travers un circuit de refroidissement primaire. Ici se pose le problème de l'accouplement thermique entre le circuit de refroidissement primaire et les caloducs. Cet accouplement devrait avoir lieu avec une chute de température aussi faible que possible; d'autre part, des essais devraient être effectués pour établir, en fonction du temps, la corrosion des caloducs due à l'apport de ~~matériau étranger~~ pour l'accouplement (brasure) et leur compatibilité avec les couches de noircissement superficiel. Au cas où le problème de démarrage de caloducs de très grande longueur peut être résolu (ce qui paraît théoriquement possible), le circuit de refroidissement primaire pourrait éventuellement être également constitué d'un caloduc.

Dans le domaine de l'homogénéisation de la température entre parois de satellites, il s'agit de caloducs fonctionnant à des températures relativement basses, nécessitant l'emploi de liquides non métalliques.

Peu ou pas de recherches ont jusqu'ici été entreprises dans la Communauté dans tous ces domaines. Les recherches suivantes pourraient être effectuées sur demande :

- comportement dans le temps de caloducs pour le refroidissement de collecteurs de convertisseurs thermoioniques,
- accouplement thermique de caloducs dans des systèmes de radiateurs,
- problèmes de démarrage de caloducs de très grande longueur
- noircissement superficiel des caloducs
- caloducs à liquides non métalliques.

Etude de caloducs avancés

Il s'agit d'études de base relatives à l'application de caloducs dans un avenir quelque peu lointain. On pense spécialement à la recherche dans le domaine de très hautes températures d'opération, comme celles que l'on rencontre dans l'application de caloducs au chauffage d'émetteurs de convertisseurs thermo-ioniques (1500-2000°C). Parallèlement, il s'agit d'études proposées pour le développement de caloducs à flux thermique exceptionnellement élevé, ainsi que de caloducs-thermostats pour l'obtention de stabilités de températures exceptionnelles. Les activités suivantes pourraient être effectuées sur demande :

- problèmes de corrosion dans les caloducs pour le chauffage d'émetteurs de convertisseurs thermo-ioniques (domaine de températures 1500-2000°C)
- structures capillaires pour flux de chaleur très élevé
- thermostats à caloducs.

4. Compétence du CCR

Il convient de mentionner ici que l'activité en matière de caloducs dans la Communauté a pris naissance à Ispra, qui conserve encore un rôle de "leadership." Diverses firmes et organisations de la Communauté se sont déjà adressées à Ispra pour information et conseil, entre autres BBC (Heidelberg), Siemens (Munich), CSF (Corbeville), Sorin (Saluggia), Sabca (Bruxelles), BelgoNucléaire (Bruxelles), Esro (Noordwijk).

La compétence d'Ispra dans le domaine des caloducs est reconnue internationalement. Cette reconnaissance s'est exprimée sous la forme de nombreuses visites de toutes les parties du monde et d'invitations à présenter des exposés synoptiques aux grandes conférences en Europe et aux USA.