

AU7603477

AAEC-LIB/Trans-606

AAEC-LIB/Trans-606

GAMMA IRRADIATION PLANTS USING REACTOR FUEL
ELEMENTS. PART II

by

W. SUCKOW

(Isotopenpraxis, 5(2) February 1969, pp.41-45)

Translated from the German by
Dr. U. Engelbert

November 1976

AUSTRALIAN ATOMIC ENERGY COMMISSION RESEARCH ESTABLISHMENT

GAMMA IRRADIATION PLANTS USING REACTOR FUEL ELEMENTS
PART II

by

W. SUCKOW

(Isotopenpraxis, 5(2) February 1969, pp.41-45)

Translated from the German by Dr. U. Engelbert

November 1976

AUSTRALIAN ATOMIC ENERGY COMMISSION

LIB/TRANS SERIES

Translations in this series were prepared as working documents for the use of research scientists at the Australian Atomic Energy Commission.

In order that they might be made available with the least possible delay, no attempt has been made to edit them, nor have all typing errors necessarily been identified and corrected.

Copies of translations in this series are made available to interested organizations and individuals only on the express understanding that they may be imperfect and do not aim to meet the standards of a published document. The Commission will not be held responsible for any inaccuracies in the translated text or for any errors resulting therefrom.

If any further reproduction of this translation is made by the recipient thereof, this note must be reproduced together with the text of the translation.

Translation

Isotopen Praxis 5 (2) 1969 Pages 41-44

Gamma Irradiation Plants Using Reactor Fuel Elements. Part II

(Summary Report). By W. Suckow (Central Institute for Nuclear Research of the German Academy of Science Berlin, Rossendorf.)

5. Fuel Element Plants at the Present Time

It is difficult to accurately describe the present status of utilisation relating to irradiation plants operated on fuel elements, because only sparse official information is being published in regards to the closing down of plant named in previous sections. The following survey is in the main based on personal information and on an estimate of the most likely situation.

The majority of the fuel element irradiators operated in the U.S.A. has been closed down. This information can be obtained from an American analysis presented to the third Geneva Conference for the peaceful use of Atomic Energy [44]. This impression is further strengthened by offers of surplus isotopic sources of ^{60}Co and, to an increasing degree, of ^{137}Cs [124]. Presumably the Argonne High Level Gamma Irradiation Facility is an exception, because recent reports have been published about this plant [94]. It is also likely that the experimental irradiator described by Hall [111, 112] is still in use, since this plant occupies a special position because of its alternating source regime in conjunction with GAR1 [118, 125].

The closing down of the Canadian plant [95, 96] has already been mentioned in Section 3.

Regarding the Australian plants it may be assumed that the system described in 1966 [117] is still operational. This impression is reinforced by published cost data for semi industrial contract irradiations. Additional fuel element plants [108] are unlikely to be in use.

In the Soviet Union fuel element plants are practically out of operation at the present time, in spite of the fact that specifically Soviet experts have repeatedly expressed themselves in favour of such plants. The irradiator installed at Moscow is - if at all - rarely used for experimental irradiations [127]. The reason for this could possibly be the excessive transport effort for fuel elements, since the plant is not located in the immediate vicinity of a reactor. The plant described by Drozdov [116] has evidently never been conceptually intended for irradiation purposes.

The English irradiator installed at Harwell is used for special irradiation [128] but it is not utilised on a continuous basis.

Although the French plant at Saclay is technologically of advantageous design because of its continuous transport system, its closing down has been reported [129]. In contrast the Belgian irradiators are in use for experimental irradiations [130].

Nothing is known about the Swedish irradiator. Because this plant was commissioned as recently as 1963 it can be assumed that it is still operational.

Since no reports exist about the Roumanian irradiator since 1959 it is assumed that it does no longer operate.

The irradiator in Bulgaria is being used for small contract irradiations and for experimental purposes.

Upon completion of its commissioning program the plant in the German Democratic Republic (GARI) is operated at present on a three-shift basis and is fully booked by industrial contracts.

The Polish reactor Eva is continuously used as a gamma radiation source for the batch sterilisation of bone preserves after it was closed down [121].

The estimate presented above leads to the conclusion that at the present time 9 fuel element plants are still in operation on a world wide basis, however the data used are not entirely certain.

The reasons for the relatively small scale of operation associated with this type of plant will be discussed later.

6. Criteria for the Optimisation of Fuel Element Irradiators

In order to judge the work potential of existing and possibly future irradiation plant criteria have to be established which permit generally valid comparisons with optimal variations. Such criteria have been established by thorough examinations [52] which will be referred to specifically later within the framework of this series of topics. Corresponding optimal variations were also established. In order to assess the described plants several results are being quoted here without discussing the background of their derivation. The examinations contain the following plant parameters including their respective relationships: (a) source configuration (b) field of application (irradiated material) (c) the operational regime of the sources and (d) the operational regime regarding the irradiated materials.

The following characteristics were employed in quantitative comparisons:-

- The overall efficiency η expressed as the ratio of the total gamma energy absorbed in the irradiated material to the total gamma energy emitted by the radiation sources
- The quality factor Γ expressed as the ratio of the gamma energy

usefully absorbed in the irradiated material to the gamma energy emitted by the radiation sources

The excessive dose factor Ψ expressed as the ratio of maximum to minimum energy dose to the irradiated material at identical irradiation time.

The gamma yield E_B (KWh/MWd) expressed as the ratio between the gamma energy available to the irradiator and the fission energy liberated during the formation of the gamma sources and

The factor of "time inconstancy" J expressed as the ratio of maximum to minimum dose yield during one source residence period in the source position

The listed characteristics generate the following criteria for the optimal conditions of individual plant parameters:-

(a) Source configuration. A source shape is optimal if its radiation field produces the largest possible quality factor coupled with a minimum requirement for excessive radiation doses. Its determination must be made in conjunction with specific conditions required for the material to be irradiated.

(b) Field of application (Material to be irradiated). A material is of optimal quality if it generates a minimum need for excessive doses and at the same time produces the highest radiation utilisation possible. It is as little as possible subject to variations in the radiation energy spectrum.

(c) Source regime. The optimal effect on an irradiator is supplied by a source regime which produces a maximum gamma yield combined with a minimum time inconstancy. The determination of an optimal source regimes must be made realistically bearing in mind the technical characteristics of operation associated with different reactor categories.

(d) Regime of irradiated materials. The management of material to be irradiated is optimal if the largest radiation utilisation is achieved in combination with a minimum requirement for excess radiation doses. This determination must be made bearing in mind the physical state of the material and the shape of the irradiation sources.

Paying attention to these criteria the quoted investigations [52] resulted in the establishment of the following concrete conditions for optimal variation of individual parameters when considering technical realities:-

(a) Source configuration. For materials of unchanged geometry a planar source with maximum height and length should be used. Desirable dimensions are $H = 150$ cm and $L = 150$ cm. For materials of partly or fully changeable geometry a line source of maximum height is preferred. The desirable dimension is $H = 150$ cm.

(b) Field of application (Material to be irradiated). Materials with effective mass numbers (Z_{eff}) of between 1 and 20 and densities ρ between 0.5 g cm^{-3} to 1.0 g cm^{-3} are optimal for irradiation. The desirable material thickness is d_{max} where the quality factor Γ is at its maximum. The thickness $d = \frac{2}{\mu(0.7 \text{ MeV})}$ may not be exceeded. $\mu(0.7 \text{ MeV})$ is the linear reduction coefficient of the material for a gamma energy $E_\gamma = 0.7 \text{ MeV}$.

(c) Source regime. For power reactors the partial cycle should be employed, where several similar reactors supply fuel elements to a common irradiator at identical time intervals, so that the residence period in the irradiator becomes as short as possible. The desirable maximum period of residence $T_p = 30$ days. For research reactors the application of the alternating cycle with two sets of core charges is optimal where the burn up time and length of residence period should be kept as short as possible. The utilisation of the fuel elements should be started one day after the end of their operation in the reactor. The desirable maximum burnup time and length of residence period are $T_{aus} = 1$ year, $T_p = 30$ days.

(d) Materials regime. A single, multi layer, continuous or intermittent transit pass of the materials to be irradiated may be used which runs parallel to the fuel element pockets of a planar source and reverses at Δ_{max} , which connotes the distance from the source where Γ reaches its maximum.

For material with partially changeable geometry a single unidirectional continuous transit path parallel to the fuel element pockets of a line source with lamellar material subdivision needs to be applied at an optimal coaxial distance (layer thickness B). B is defined as the coaxial distance of cylindrical arrangements, optimal distances will be discussed at a later stage.

For material of completely changeable geometry a turbulent material mixing motion drifting parallel to the fuel element pockets of a line source needs to be employed.

7. Assessment of existing plants.

Considering the present degree of development of the various types of

irradiation plants the assessment of existing fuel element irradiator needs to take into account the question if these plants are capable of technical application to industrial production processes. The answer to this question needs to be positive in order to face competition with other types of irradiator. If the plants listed in Section 4 are compared with the optimal variations listed in Section 6 the following picture for individual plant parameters emerges:-

(a) Source Configuration. The structural layout and sizes of radiation sources in irradiation plants previously described lead to the conclusion that the plants are designed for irradiations on an experimental scale. Therefore characteristics of optimum source shape in conjunction with operational requirements and fields of application are not in evidence.

There is little doubt that the honeycomb shaped source configurations as exemplified in plants (1a, 1c, 12, 13, 14, 17, 18a and 21*) generate useful quality factors (for the English plant [106] 8% was mentioned) as well as relatively low factors of excessive doses, because of the irradiation regime dictated by the source shape the plants are unsuitable for technological application.

The quoted cylindrical sources are not advantageous when a high quality factor is desired, although the irradiated materials in plant 1b 2 and 19 rotate in azimuthal homogeneity. Conditions in plants 5,6,7,11 and 15 are more advantageous, if they are fitted with cylindrical radiation chemical reaction vessels which permit a turbulent revolving mixing of liquids. However maximum quality factors can not be obtained in this system. Similarly the split cylindrical source 24a generates only a low quality factor, however a low factor of excessive dose can be achieved by moving irradiated material in a diagonal path. Compared with the source configurations previously listed it offers the advantage of a continuous irradiation regime. The Soviet irradiator (15) permits the configuration of a cylindrical source as well as that of a line and planar source. However apart from suitable irradiation source dimensions the plant does not have a material transport system which is absolutely necessary for industrial scale irradiations in planar source configurations. If its line source

*Numbered references in brackets refer here and in the following text to the listing number of plants in Table 2 (Part I).

configuration can be installed as the axis of a cylindrical radiation chemical reaction vessel the plant approaches the optimal configuration for the irradiation of liquids. In this regard the Roumanian plant (22) is well designed in spite of its simplicity.

For the irradiation of solid materials with fixed geometry the French irradiator (18b) approaches optimum conditions of irradiation most closely of all plants so far installed. This irradiator appears to be attractive in regards to the source dimensions as well as to the transport system.

The harmony of source configuration and irradiation regime in plant (25) is almost perfect, however this irradiator is only in the project stage.

(b) Field of application (Material to be irradiated). Very few irradiation plants have been commissioned for the treatment of specific materials. This applies only to the configuration 2 and 22 in a limited extent to 5,6,7, 10 and 18a.

Far more frequently fuel elements have been placed as sources into irradiators simply for the purpose of exploiting their gamma radiation and variable materials supplied by clients were irradiated without any substantial preselection.

Under these conditions an optimal tuning of irradiation source to material can generally not be expected. It is true that the large proportion of material supplied in this manner meets the requirements for a low effective mass number ($Z_{eff} \approx 20$). However the desirable range of density is frequently exceeded. The density range is generally achieved with food products, vulcanised materials and compact products of radiation chemistry. In general terms the field of application (materials) does not deviate from the optimum range to the degree experienced with other plant parameters.

(c) Source regime. In order to achieve a high gamma yield in the irradiator the alternating source cycle needs to be applied.

It is evident from the previous plant descriptions that only the American irradiator (9) and the Rossendorf irradiator GARI (24a) apply this source regime. However GARI employs a period of residence $T_p = 56$ days and utilisation begins normally on the 5th day which means that the plant is still well removed from operating with an optimal regime. If the reported 2.5 hours cycle is maintained in the American plant it will approach optimal conditions for the source regime. The remaining characteristics of this plant however, specifically

the quality factor and the material regime are completely unsatisfactory for industrial scale applications.

All other remaining irradiations employ burned up fuel elements under often very unattractive conditions. If for instance according to report [97] MTR elements are supplied to private irradiation plant operators in the U.S.A. after 90 days of cooling the gamma yield will be very small although the consistency with time (time constancy) will be good.

Among the plants employing partial or total source cycles those are still most effective which begin the utilisation of the elements in the irradiator shortly after the reactor shutdown at residence periods of \approx 2 months (1a, 11). In this category the American projects (25 and 28) can be named where a residence period length of two months is envisaged and the utilisation begins in (27 and 28) on the 14th day. In summary it can be said for the source regimes that in almost all plants the optimal conditions for the achievement of high gamma yield and for low changeability of radiation with time (time inconstancy) are not obtained to any approximation.

(d) Materials regime. All plants designed to irradiate solid material in a stationary state are unsuitable for industrial irradiations. This condition does not change significantly if the material is rotated (1a, 1b and 19). Only 3 existing fuel element irradiations (2, 18b and 24a) incorporate transport systems for solid materials. Lower factors of excess doses were obtained in plant (2) by simultaneous rotation of materials and in plant (24a) by diagonal material transit. However the quality factors in both plants were unsatisfactory. The French irradiator (18b) appears to be the most attractive in this category. It features a continuous one layer material travel path which is at 90° to the source axis at the point where the material changes direction and returns. Project (25) needs to be quoted again at this point as the best solution. It produces optimal conditions by continuous multi-layer travel of the material parallel to the source axis. The material reverses on this path. The material regime in plants specifically designed to irradiate liquids (5, 6, 7 and 22) is not known with certainty. Especially information is missing on the question to what extent the technique of turbulent mixing is being used in order to produce a good homogen. In this category the Romanian plant (22) appears to be most attractive because of its high quality factor. Thus the characteristics of the

existing fuel element irradiation plant in relation to the material handling regime are such that their employment in a technological (industrial) scale under optimal condition is not possible.

The summary of the estimates in above leads to the conclusion that none of the fuel element irradiators commissioned during the past 15 years displays characteristic properties which can be regarded as optimal for industrial technological application.

8. Prospects of applications.

Since the development of irradiators during the present decade favour to an increasing degree the design and construction of types which can handle industrial irradiations under economic conditions it becomes understandable that the application of fuel elements has been increasingly pushed into the background. The established irradiation results of plants of this kind have produced little incentive to commission further irradiation plants using fuel element radiation sources. The prospect of these irradiators competing successfully with other types in the industrial application, can only be adequate, if all plant parameters can be brought into close vicinity of optimal conditions.

It can not be denied that compared with long lived radionuclide such as ⁶⁰Co to fuel elements suffer natural disadvantages as radiation sources. However as pointed out in the introduction these disadvantages can be compensated for to a large degree in a physical and technological respect, if individual parameters of plant and irradiation technique are combined advantageously. Even in the economic context it was pointed out [52] that a competitive situation with other types of plant can be achieved under specific conditions. All that can be said at this point is that a minimum range of plant capacity (expressed for example in Megarad-tonnes per year) needs to be exceeded and that all irradiators operated with fuel elements up to date did not meet this requirement.

Little doubt exists that countries which possess other technologically easier manageable sources of radiation - and these are the countries which have contributed most to the development of irradiators based on fuel elements - are unlikely to use this type of plant in the future.

In contrast it will be up to countries which are looking for an increase irradiation capacity to utilize the gained experience and to employ fuel element irradiators economically by developing optimal designs and operational techniques. The fact that several countries show an intensive interest in the reported investigations and in the operational experience with the GARI plant demonstrates that these considerations are of importance in the modern context.

9. Literature

(1) Conf. on Radioisotope Production of Medical Isotopes, Guelph, Apr. 1966.

(2) First Int. Symp. on Radioisotope Production in the Field of Med. Pharm., London and Prague, Feb. London 1966.

(3) First Symp. on Radioisotope Production of Medical Isotopes, Bucharest, June 1966, IAEA, Vienna, SM 92.

(4) Radiation Chemistry, Proc. of the Symposium of London, Sept. 1967, Budapest 1967.

(5) A. Chapiro, Radiation Chemistry of Living Systems, High Energy Physics, Vol. 13, New York-London 1967.

(6) E. Beyer, J. Hinkel, Chemistry of Radioisotopes, New York, Wiley-Interscience, 1966.

(7) Isotopes, Proc. of the Symposium of London, Sept. 1967.

(8) First Symp. on Food Irradiation by FAO and IAEA, Budapest, 1966, IAEA, Vienna 1966, SM 77.

(9) A. Taly, Isotopopravka (1967), 6, 101 and 11.

(10) J. Popovits, V. D. Holovak, Proceedings of Conference on Industrial Uses of Large Radiation Sources, IAEA, Vienna 1965, Vol. 1, 281.

(11) G. H. Miller, Radiation Sources, ed. by E. Chapiro, 1966, p. 161.

(12) E. Beyer, E. F. G. Flynn, in Radioisotopes of Medical Products, Budapest, June 1967, IAEA, Vienna, SM 92, 52.

(13) E. L. Fisher, D. R. Hoeg, U. S. J. Radiol. Nucl. Chem. 11 (1963), No. 10, 8-14.

(14) K. D. Fisher, Radiat. Mater. and Methods, Int. J. (1967), 8, 102, 112.

(15) E. J. Farrell, Radiation Sources, ed. by A. Chapiro, Pergamon Press, 1966, p. 25.

(16) J. J. Knowlton, H. H. Yakin, J. H. Howell, Nucl. Chem. 11 (1953), No. 11, 6-8.

(17) H. F. Winkler, Radiation Sources, ed. by E. Chapiro, 1966, p. 173.

(18) D. J. Duggan, Nucl. 86, Basel, Sept. 1966, Intern. Meeting, No. 96, 9-14.

(19) H. Bauer, Exp. Tech. Phys. 11 (1963), 8, 216.

(20) J. T. Cooper, J. D. Henderson, J. F. Penckow, Nucl. and Radiat. Sept. 1966, Intern. Meet. No. 86, 9-11.

(21) D. Reichel, Nucl. 86, Basel, Sept. 1966, Intern. Meeting, No. 86, 9-11.

(22) Lieferprogramm der High Voltage Engineering Corporation, IAEA (Hochspannung).

(23) Lieferprogramm von Technosport, Feb. 1967 (Hochspannung).

(24) Lieferprogramm der AECI, Canada (Hochspannung).

(25) S. Jefferson, J. Cooper, Symp. on Radioisotopes of Medical Products, Budapest, June 1967, IAEA, Vienna, SM 92, 51.

(26) M. D. Brown, Symp. on Radioisotopes of Medical Products, Budapest, June 1967, IAEA, Vienna, SM 92, 53.

(27) M. Michalski, Proc. of Conf. on Large Radiation Sources in Industry, Warsaw 1966, IAEA, Vienna 1966, Vol. 2, 161.

(28) H. D. Heine, K. D. Holovak, Radiat. 11 (1967), 6, 1-3.

(29) P. J. H. Ho, Nucl. 86, Basel, Sept. 1966, Intern. Meeting, No. 86, 6-1.

(30) H. D. Heine, Nucl. 86, Basel, Sept. 1966, Intern. Meeting, No. 86, 6-4.

(31) T. Hainke, Symp. on Food Irradiation, Kozsok, 1966, IAEA, Vienna 1966, SM 77, 10.

(32) H. Hainke, Symp. on Food Irradiation, Leningrad, 1966, IAEA, Vienna 1966, SM 77, 11.

(33) P. Furek, Nucl. 86, Basel, Sept. 1966, Intern. Meeting, No. 86, 6-3.

(34) J. J. Macdonald, AECI, Sept. 1967, 20, 1-3, 1967.

(35) E. J. Farrell, Int. Congr. Indust. Crops, 1967, p. 109.

(36) D. Yamamoto, K. K. M. Ford, IAEA, Vienna, 1966, Vol. 1, 1966, p. 109.

(37) J. K. Duggan, Proc. of Conf. on Large Radiation Sources in Industry, Warsaw 1966, IAEA, Vienna 1966, Vol. 2, 162.

(38) J. K. Duggan, Proc. of Conf. on Industrial Uses of Large Radiation Sources, Salzburg 1966, IAEA, Vienna 1966, Vol. 1, 176.

(39) F. Hirtel, M. Sanda, J. Conf. IAEA, Geneva, 1966, Vol. 1, 1966 and Vol. 2, 1-140.

(40) H. K. H. Fickelberg, Proc. of Conf. IAEA, Vienna, 1966, Vol. 2, 1-180.

(41) D. Heine, Atomkernenergie (1967), 6, 146.

- 112) *B. Danowitz* u. a., 3. Conf. PUAE, Geneva 1963, Vol. 1, P. 292.
- 113) *F. Hoyer* u. a., 3. Conf. PUAE, Geneva 1963, Vol. 1, P. 412.
- 114) *F. J. Dabrowski* u. a., 3. Conf. PUAE, Geneva 1963, Vol. 1, P. 108.
- 115) *K. Hoyer*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 116) *F. J. Danowitz, F. J. Dolan, J. F. Conl*, PUAE, Geneva 1963, Vol. 1, P. 171.
- 117) *H. H. Zimm, H. P. Gohlich*, 2. Conf. PUAE, Geneva 1958, Vol. 8, P. 1311.
- 118) *V. X. Nucleonics 16* (1958) No. 1, S. 21.
- 119) *F. G. Berger*, China. Atom. (1959) No. 3, P. 12.
- 120) *J. E. Pinn*, Proc. of Conf. on Large Radiation Sources in Industry, Warsaw 1959, IAEA, Vienna 1960, Vol. 2, 321.
- 121) *J. S. Fuchs*, Proc. of Conf. on Industrial Uses of Large Radiation Sources, Salzburg 1963, IAEA, Vienna 1963, Vol. 2, 361 (Final Discussion).
- 122) *H. Schöler*, Untersuchungen zur Bestimmung der Optimalbelegung für Quellbetrieb, Bestockung und Durchschlagung kontinuierlicher Strahlungsanlagen mit Reaktorbrunnenelementen. Abschlußbericht VFA 151/67, Rossendorf 1967.
- 123) *C. Corradi, A. Magagnoli*, Industriechemie Studien: The Edison Products, McGraw Hill Book Comp. Inc. 1954, Vol. 2.
- 124) *S. Kubota*, Nucleonics 18 (1960) No. 11, S. 201.
- 125) *S. Glasstone*, Principles of Nuclear Reactor Engineering, D. van Nostrand, Princeton N. J. 1955.
- 126) *B. M. Kozlov, G. K. Poljan*, AEXN 116 (1958).
- 127) *A. Hirsch*, Z. Naturforsch. 19a (1964), S. 978.
- 128) *P. Lindner, H. Miesler*, Z. Physik 170 (1963), S. 214.
- 129) *J. Oberst*, Kernenergie 6 (1963), S. 390.
- 130) *J. Oberst*, Nucleonics 11 (1963) No. 5, S. 28 and AEXN 141 (1963).
- 131) *F. E. Schar, F. K. Chinn*, 2. Conf. PUAE, Geneva 1958, Vol. 15, P. 602.
- 132) *F. H. Cook*, NDV 21, 19 (1954).
- 133) *F. E. Schar, H. B. King*, Nuclear Sci. Engng. 1 (1955), S. 140.
- 134) *F. Lindner, K. Lau, H. Thomsen*, 2. Conf. PUAE, Geneva 1958, Vol. 13, P. 5119.
- 135) *J. K. Keister III*, Reactor Shielding Design Manual, New York 1959.
- 136) *H. Hoyer*, The Attenuation of Gamma Rays and Neutrons in Reactor Shields, USAEC Contract A1430-1-862, 1957.
- 137) *K. Hoyer, F. P. Wagner*, Phys. Rev. 70 (1948), S. 115, 11 (1949), S. 115.
- 138) *F. J. Danowitz, J. Fischer*, WAFD P. 652 (1960).
- 139) *F. J. Danowitz*, WAFD P. 651 (1959).
- 140) *F. G. Berger*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 141) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 142) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 143) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 144) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 145) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 146) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 147) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 148) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 149) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 150) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 151) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 152) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 153) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 154) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 155) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 156) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 157) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 158) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 159) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 160) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 161) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 162) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 163) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 164) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 165) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 166) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 167) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 168) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 169) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 170) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 171) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 172) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 173) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 174) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 175) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 176) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 177) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 178) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 179) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 180) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 181) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 182) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 183) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 184) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 185) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 186) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 187) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 188) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 189) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 190) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 191) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 192) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 193) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 194) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 195) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 196) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 197) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 198) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 199) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.
- 200) *F. J. Danowitz*, Atomwirtschaft 7 (1961), S. 398.

γ -Bestrahlungsanlagen mit Reaktorbrennelementen, Teil II

(Zusammenfassender Bericht)

H. Suckow

(Zentralinstitut für Kernforschung der DAW zu Berlin, Rossendorf¹⁾)

Inhaltsübersicht

5. Brennelementanlagen in der Gegenwart
6. Kriterien zur Optimierung von Brennelementanlagen
7. Beurteilung der realisierten Anlagen
8. Anwendungsaussichten
9. Literatur

Keywords:

fuel elements radiation effects
gamma radiation radiation sources

5. Brennelementanlagen in der Gegenwart

Den gegenwärtigen Stand der Nutzung von Bestrahlungsanlagen mit Brennelementen richtig darzustellen, bereitet uns großen Schwierigkeiten, als nur spärlich offizielle Informationen über die Stilllegung der in den vorigen Abschnitten genannten Anlagen erschienen. Die nachfolgende Übersicht basiert im wesentlichen auf persönlichen Mitteilungen und auf Einschätzungen der wahrscheinlichen Situation.

Die Mehrzahl der in den USA installierten Brennelementanlagen wurde stillgelegt. Das läßt sich aus einer amerikanischen Stellungnahme auf der Dritten Genfer Konferenz für die friedliche Nutzung der Atomenergie [44] ableiten. Dafür spricht auch das Überschußangebot an Isotopenquellen aus ^{60}Co und zunehmend aus ^{137}Cs [124]. Ausgenommen hiervon ist wahrscheinlich die „Argonne High Level Gamma Irradiation Facility“, da über diese Anlage unlängst erneut berichtet wurde [91]. Möglicherweise wird auch die von Hall [111, 112] beschriebene Anlage für Experimentierzwecke noch genutzt, da sie mit ihrem alternierenden Quellenregime zusammen mit GARI [118, 125] eine Sonderstellung einnimmt.

Die Stilllegung der kanadischen Anlage [95, 96] wurde bereits im 3. Abschnitt erwähnt.

Hinsichtlich der australischen Anlagen kann angenommen werden, daß die 1966 beschriebene Anordnung [117] in Betrieb ist. Das wird unterstrichen durch die Angaben konkreter Bestrahlungskosten für halbindustrielle Auftragsbestrahlungen. Weitere Brennelementeinrichtungen [108] dürften nicht mehr genutzt werden.

In der Sowjetunion werden gegenwärtig Brennelementanlagen praktisch nicht betrieben, obgleich sich gerade sowjetische Experten mehrfach für deren Einsatz ausgesprochen haben. Die in Moskau installierte Einrichtung wird – wenn überhaupt – nur selten für Experimentierzwecke benutzt [126]. In der Anlage von Obninsk wurden die Brennelemente durch ^{60}Co Quellen ersetzt [127]. Möglicherweise resultiert das aus einem zu großen Transportaufwand für die Elemente, da diese Anlage nicht in unmittelbarer Nähe eines Reaktors steht. Die von Dresden [116]

^{1) An der OT-1041, Dresden, Postfach 19.}

beschriebene Einrichtung war offenbar bereits von ihrer Konzeption her nicht für Bestrahlungszwecke vorgesehen.

Die in Harwell installierte englische Anlage wird für Spezialbestrahlungen genutzt [128], wenngleich sie nicht kontinuierlich ausgelastet wird.

Obwohl die französische Anlage in Saclay mit ihrem kontinuierlichen Transportsystem technologisch vorteilhaft eingerichtet ist, erfolgte nach einer Mitteilung [129] ihre Stilllegung. Dagegen werden die belgischen Einrichtungen für experimentelle Zwecke eingesetzt [130].

Über den Stand der schwedischen Anlage ist nichts bekannt. Da sie erst 1963 in Betrieb genommen wurde, sollte jedoch erwartet werden, daß sie gegenwärtig noch genutzt wird.

Da seit 1959 keine Mitteilungen über die rumänische Anlage mehr erfolgten, wird angenommen, daß sie nicht mehr arbeitet.

Die Bestrahlungsanordnung in Bulgarien wird für kleinere Auftragsbestrahlungen und Experimente verwendet.

Nach Beendigung des Probelaufes wird gegenwärtig die in der DDR errichtete Anlage GARI in dreischichtigem Rhythmus betrieben und ist durch Industrienaufträge ausgelastet.

Der polnische Reaktor Ewa wird nach dem Abschalten als γ -Strahlungsquelle für die serienmäßige Sterilisation von Knochenkonserven fortlaufend ausgenutzt [121].

Aus vorstehender Einschätzung folgt, daß sich gegenwärtig im Weltmaßstab noch neun Brennelementanlagen in Betrieb befinden, wobei die Angaben jedoch nicht unbedingt sicher sind.

Auf die Gründe dieser relativ geringen Anwendungsbreite wird später noch eingegangen.

6. Kriterien zur Optimierung von Brennelementanlagen

Um die bereits realisierten und gegebenenfalls noch zu errichtenden Brennelementanlagen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit beurteilen zu können, müssen Kriterien vorhanden sein, die allgemeingültige Vergleiche mit Optimalvarianten ermöglichen.

In umfassenden Untersuchungen [52], auf die im Rahmen dieser Themenreihe später speziell eingegangen wird, wurden solche Kriterien aufgestellt und entsprechende Optimalvarianten ermittelt. Zur Beurteilung der beschriebenen Anlagen werden verschiedene Resultate bereits hier vorweggenommen, ohne jedoch auf ihre Ableitung einzugehen.

Die Untersuchungen enthalten folgende Anlagenparameter einschließlich ihrer Wechselbeziehungen: a) Quellenform, b) Einsatzgebiet (Bestrahlung), c) Betriebsregime der Quellen, d) Betriebsregime des Bestrahlgutes.

Als Kenngrößen für quantitative Vergleiche wurden angesetzt:

die Gesamteffektivität η als Verhältnis der im Bestrahlung insgesamt absorbierten zu der von den Quellen emittierten γ -Energie;

der Gütefaktor F als Verhältnis der im Bestrahlung nutzbar absorbierten zu der von den Quellen emittierten γ -Energie;

der Überdosierungsfaktor Ψ als Verhältnis von maximaler zu minimaler Energiedosis im Bestrahlung bei gleicher Bestrahlzeit;

die γ -Ausbeute E_B [kWh/MWd] als Verhältnis der in der Bestrahlungsanlage ausnutzbaren γ -Energie zur Spaltenergie, die während der Bildung der γ -Quellen freigesetzt wurde, und der Zeitkonstantenfaktor J als Verhältnis von maximaler zu minimaler Dosisleistung während einer Quellenperiode am gleichen Ort.

Ausgehend von den genannten Kenngrößen ergeben sich folgende Kriterien für die Optimalbedingungen der einzelnen Anlagenparameter:

a) Quellenform

Optimal sind Quellenformen, deren Strahlenfelder den größtmöglichen Gütefaktor hervorrufen und gleichzeitig die kleinstmögliche Überdosierung verursachen. Die Bestimmung muß in Verbindung mit den Bestrahlungbedingungen erfolgen.

b) Bestrahlung

Optimal sind Bestrahlungen (Materialien), die bei größtmöglicher Strahlenausnutzung die kleinstmögliche Überdosierung verursachen und dem Einfluß der Spektraländerung möglichst wenig unterliegen.

c) Quellenregime

Optimal bezüglich der Auswirkung auf die Bestrahlungsanlage sind Quellenregime, die bei größtmöglicher γ -Ausbeute die kleinstmögliche Zeitkonstante hervorrufen. Die Bestimmung muß in Verbindung mit den realen technischen Betriebsbedingungen verschiedener Reaktorkategorien erfolgen.

d) Bestrahlungregime

Optimal sind Bestrahlungregime, die bei größtmöglicher Strahlenausnutzung die kleinstmögliche Überdosierung bewirken. Die Bestimmung muß in Verbindung mit den Zustandsformen des Bestrahlgutes und den Quellenformen erfolgen.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien ergaben die erwähnten Untersuchungen [52] folgende konkrete Bedingungen für die Optimalvarianten der einzelnen Parameter, wobei die realen technischen Gegebenheiten berücksichtigt wurden:

a) *Quellenform* Für Bestrahlung mit unveränderlicher Geometrie ist eine Flächenquelle mit möglichst großer Höhe und

Länge einzusetzen. Anzustrebende Minimalabmessungen sind $H = 150$ cm, $L = 150$ cm.

Für Bestrahlung mit teilveränderlicher und vollveränderlicher Geometrie ist eine Linienquelle mit möglichst großer Höhe einzusetzen. Anzustrebende Minimalabmessung ist $H = 150$ cm.

b) *Bestrahlung*. Als Bestrahlung sind Materialien einzusetzen, deren effektive Ordnungszahl Z_{eff} zwischen 1 und 20 liegt und deren Dichte ρ Werte zwischen $0,5 \text{ gem}^{-3}$ und $1,0 \text{ gem}^{-3}$ besitzt. Als Materialdicke ist $d_{\text{max}}^{(1)}$ anzustreben, und d

$$= \frac{2}{\mu(0,7 \text{ MeV})} \text{ darf nicht überschritten werden.}$$

c) *Quellenregime*. Für Energieraktoren ist der partielle Zyklus anzuwenden, wobei mehrere gleichartige Reaktoren in gleichmäßigen Abständen Brennelemente in dieselbe Bestrahlungsanlage liefern, so daß in dieser Anlage die Periodenlänge möglichst klein wird. Anzustrebende maximale Periodenlänge ist $T_p = 30$ d. Für Forschungsreaktoren ist der alternierende Zyklus mit zwei Kernladungen anzuwenden, wobei die Ausbrandzeit und die Periodenlänge möglichst klein zu halten sind und die Ausnutzung einen Tag nach Operationsende beginnt. Anzustrebende maximale Ausbrandzeit und Periodenlänge sind T_{aus} bzw. $T_p = 30$ d.

d) *Bestrahlungregime*. Für Bestrahlung mit unveränderlicher Geometrie ist einmaliger, mehrschichtiger, kontinuierlicher oder intermittierender Durchlauf parallel zu den Brennelementachsen einer Flächenquelle mit Materialumwendung bei $J_{\text{max}}^{(2)}$ anzuwenden.

Für Bestrahlung mit teilveränderlicher Geometrie ist einmaliger, parallel gleichgerichteter, kontinuierlicher Durchlauf parallel zu den Brennelementachsen einer Linienquelle mit lamellierter Materialunterteilung bei optimal variiertem Koaxialabstand (Schichtdicke) $B^{(3)}$ anzuwenden.

Für Bestrahlung mit vollveränderlicher Geometrie ist turbulente Materialumwälzung mit Dreifach parallel zu den Brennelementachsen einer Linienquelle anzuwenden.

7. Beurteilung der realisierten Anlagen

Beim gegenwärtigen fortgeschrittenen Entwicklungsstand der verschiedenen Typen von Bestrahlungsanlagen muß eine Beurteilung der bisher realisierten Brennelementanlagen besonders unter dem Gesichtswinkel erfolgen, ob sie sich für den technischen Einsatz bei industriellen Produktionsprozessen eignen. Nur bei Erfüllung dieser Voraussetzung besteht Aussicht, daß sie sich neben anderen Anlagentypen behaupten können.

Werden unter diesem Aspekt die im 4. Abschnitt zusammengestellten Anlagen mit den im 6. Abschnitt genannten Optimalvarianten verglichen, so ergibt sich für die einzelnen Anlagenparameter das folgende Bild:

a) *Quellenform*

Die meisten der beschriebenen Anlagen sind, wie aus Aufbauform und Quellengröße geschlossen werden kann, für B

¹⁾ d_{max} : Materialdicke, bei der F maximal wird

²⁾ $\mu(0,7 \text{ MeV})$: linearer Schwächungskoeffizient des Materials bei $E_\gamma = 0,7 \text{ MeV}$.

³⁾ J_{max} : Abstand von der Quelle, bei dem F maximal wird

⁴⁾ B : Koaxialabstand zylindrischer Anordnungen; über die optimalen Abstände wird später berichtet

strahlungen im experimentellen Maßstab eingerichtet. Demzufolge fehlen größtenteils diejenigen Merkmale, die bei Bestrahlungen im technischen Maßstab für optimale Quellenformen in Verbindung mit Betriebsregime und Einsatzgebiet kennzeichnend sind.

Zweifellos bieten die wabenförmigen Quellenanordnungen, wie sie in den Anlagen (1a, 1c, 12, 13, 14, 17, 18a und 21¹⁾) installiert sind, brauchbare Werte des Gütefaktors (für die englische Anlage werden 8% genannt [106]) und auch relativ geringe Überdosierungsfaktoren, aber für einen technischen Einsatz sind sie infolge des durch die Quellenform vorgegebenen Bestrahlungsregimes ungeeignet.

Die angeführten Zylinderquellen sind hinsichtlich eines hohen Gütefaktors unvorteilhaft, auch wenn das Bestrahlungsregime in den Anlagen (1b, 2 und 19) zur azimutalen Homogenisierung rotiert. Die Verhältnisse liegen bei den Anlagen (5, 6, 7, 11 und 15) günstiger, falls dort zylinderförmige strahlenchemische Reaktionsgefäße mit turbulenter Umwälzung von Flüssigkeiten eingebracht werden. Jedoch auch hierbei werden maximale Gütefaktoren nicht erreicht.

Die installierte Zylinderspaltquelle (24a) läßt ebenfalls nur einen geringen Gütefaktor zu, dagegen kann durch diagonalen Materialwechsel ein niedriger Überdosierungsfaktor erzielt werden. Gegenüber den vorgenannten Quellenformen bietet sie den Vorteil eines kontinuierlichen Bestrahlungsregimes.

Die sowjetische Anlage (15) gestattet außer der Anordnung einer Zylinderquelle die Herstellung einer Linien- oder Flächenquelle. Als Flächenquelle fehlt der Anlage, neben der geeigneten Quellenabmessung, ein Transportsystem, was bei dieser Quellenform für optimale industrielle Bestrahlungen unabdingbar ist. Falls die Linienquelle als Achse eines zylinderförmigen, strahlenchemischen Reaktionsgefäßes eingesetzt werden kann, nähert sich die Anlage in dieser Ausführung der Optimalform für Flüssigkeitsbestrahlungen. In dieser Hinsicht ist die rumänische Anlage (22), trotz ihrer Einfachheit, günstig ausgelegt.

Von allen installierten Anlagen kommt die französische (18b) den Optimalbedingungen für Bestrahlung von festem (geometrisch unveränderlichem) Bestrahlungsregime am nächsten. Im Hinblick auf Quellenabmessung und Transportsystem erscheint diese Anlage vorteilhaft.

Näherzu perfekt im Zusammenwirken von Quellenform und Bestrahlungsregime ist die Anlage (25), die allerdings nur als Projekt vorliegt.

b) Einsatzgebiet (Bestrahlung)

Nur wenige Anlagen wurden zielgerichtet für ganz bestimmte Bestrahlungsregime installiert. Das trifft zu für die Anordnungen (2 und 22) und in beschränktem Maße für (5, 6, 7, 10 und 18a).

Viel häufiger wurden die Brannelemente zur Ausnutzung ihrer γ -Strahlung schlechthin als Quellen in die Bestrahlungsanlagen eingesetzt, wobei verschiedenartiges, von den Auftragegebern angefordertes Material, ohne wesentliche Vorauswahl, bestrahlt wurde.

Unter diesen Bedingungen kann im allgemeinen von einer optimalen Abstimmung zwischen Quelle und Bestrahlung nicht gesprochen werden. Allerdings genügt ein großer Teil der ablichtbaren angeforderten Bestrahlungsleistungen, wenn einer niedrig effektiven Ordnungszahl ($Z_{eff} = 20$).

¹⁾ Die in Klammern gesetzten Zahlen verweisen hier und im folgenden auf die Anlagen-Symbole der Anlagen in Tabelle 2 (Teil I).

Dagegen bleibt der günstige Materialdichtebereich vielfach unterschritten. Eingehalten wird er, wo Lebensmittel, Vulkanisate oder andere kompakte strahlenchemische Objekte eingesetzt werden.

Generell weicht das Einsatzgebiet vom Optimalbereich nicht so weit ab wie die übrigen Parameter der Bestrahlungsanlagen.

c) Quellenregime

Zur Erzielung einer hohen γ -Ausbeute in der Bestrahlungsanlage ist der alternierende Quellenzyklus anzuwenden.

Aus der Anlagenbeschreibung ist ersichtlich, daß nur die amerikanische Anordnung (9) und die Rossendorfer Anlage (GAR) (24a) mit diesem Regime arbeiten. Dabei ist GAR mit einer Periodendauer $T_p = 56d$ und dem normalen Ausnutzungsbeginn am fünften Tag noch beträchtlich vom Optimalregime entfernt. Falls in der amerikanischen Anlage der angegebene 2,5 Stunden-Zyklus eingehalten wird, so bestehen hier weitgehend die Optimalbedingungen des Quellenregimes. Dagegen sind die übrigen Eigenschaften dieser Anlage, insbesondere der Gütefaktor und das Bestrahlungsregime, für technische Belange völlig unzureichend.

Alle übrigen Einrichtungen verwenden ausgebrannte Elemente unter teilweise sehr ungünstigen Bedingungen. Wenn beispielsweise nach der Mitteilung [97] in den USA MTR-Elemente an private Anlagenbetreiber erst nach 90 Abklingtagen ausgeliefert werden, dann resultiert zwar für die Quelle eine gute Zeitkonstanz, die γ -Ausbeute jedoch wird sehr gering.

Unter den Anlagen mit partiellem oder totalem Quellenzyklus sind diejenigen noch am effektivsten, die bei Periodenlängen $T_p \leq 2$ m kurz nach dem Abschalten des Reaktors mit der Ausnutzung der Elemente beginnen (1a, 11). In dieser Kategorie können die amerikanischen Projekte (25 bis 28) mit genannt werden, für die eine Periodenlänge von zwei Monaten vorgesehen ist, wobei für den Ausnutzungsbeginn von (27 und 28) der 14. Tag angesetzt wird.

Zusammenfassend läßt sich zum Quellenregime feststellen, daß bei fast allen Anlagen die Optimalbedingungen zur Erzielung hoher γ -Ausbeuten und geringer Zeitkonstanz nicht annähernd eingehalten werden.

d) Bestrahlungsregime

Alle Anlagen, in denen festes Bestrahlungsregime im stationären Zustand bestrahlt wird, sind für technische Bestrahlungen ungeeignet. Daran ändert auch die Rotation des Bestrahlungsregimes (1a, 1b und 19) nichts wesentliches.

Lediglich in drei installierten Brannelementenanlagen (2, 18b und 24a) sind Transportsysteme für festes Bestrahlungsregime angeordnet. Dabei werden in Anlage (2) durch gleichzeitige Rotation und in Anlage (24a) durch diagonalen Materialwechsel niedrige Überdosierungsfaktoren eingehalten, aber die Gütefaktoren bleiben unbefriedigend. Am günstigsten erscheint in dieser Kategorie die französische Anlage (18b) mit ihrem kontinuierlichen, einschichtigen Durchlauf senkrecht zu den Quellenachsen bei Materialumwälzung. Als beste Lösung muß auch an dieser Stelle das Projekt (25) genannt werden, das bei kontinuierlichem, mehrschichtigem Durchlauf parallel zu den Quellenachsen mit Materialumwälzung den Optimalbedingungen entspricht.

Welches Bestrahlungsregime in denjenigen Anlagen angewendet wird, wo vorzugsweise Flüssigkeiten bestrahlt werden (5, 6, 7 und 22), ist nicht genau bekannt. Besonders fehlen

Angaben, inwieweit von der Möglichkeit des Umwirlens zur Erzeugung einer guten Homogenität Gebrauch gemacht wird. Am vorteilhaftesten erscheint in dieser Kategorie hinsichtlich eines hohen Gütefaktors die rumänische Anlage (22).

Somit fehlen den realisierten Brennelementanlagen auch hinsichtlich des Bestrahlungregimes in den meisten Fällen die Voraussetzungen, um für Bestrahlungen im technischen Maßstab unter optimalen Bedingungen eingesetzt werden zu können.

Die Zusammenfassung der obigen Einschätzungen führt zu dem Ergebnis, daß keine der in den vergangenen fünfzehn Jahren installierten Bestrahlungseinrichtungen mit Reaktorbrennelementen über alle Kennwerte verfügt, mit denen sie im Hinblick auf eine technische Anwendung als optimal bezeichnet werden kann.

8. Anwendungsaussichten

Da die Entwicklung von Bestrahlungsanlagen im gegenwärtigen Jahrzehnt immer stärker auf die Errichtung solcher Typen drängt, mit denen Industriebestrahlungen unter ökonomisch günstigen Bedingungen durchführbar sind, wird bei Berücksichtigung der letztgenannten Einschätzung verständlich, weshalb der Einsatz von Brennelementanlagen immer mehr in den Hintergrund trat. Die bisher installierten Anlagen dieser Art, einschließlich der damit erzielten Bestrahlungsergebnisse, bieten wenig Anreiz, weitere Brennelementanlagen in Betrieb zu nehmen. Aussicht auf erfolgreiche Konkurrenz mit anderen Typen können diese Anlagen beim technischen Einsatz zukünftig nur erlangen, wenn sie in allen Parametern den Optimalbedingungen weitgehend angeglichen werden.

Es kann nicht in Abrede gestellt werden, daß Brennelemente als Strahlungsquellen gegenüber langlebigen Radionukliden wie ⁶⁰Co von ihrer Natur her Nachteile besitzen. Jedoch lassen sich diese Nachteile in physikalisch-technischer Hinsicht, wie bereits in der Einleitung erwähnt, bei günstiger Kombination der einzelnen Parameter von Anlage und Bestrahlungstechnologie weitgehend ausgleichen. Auch im Hinblick auf die Ökonomie wurde in den erwähnten Untersuchungen [52] angedeutet, daß unter bestimmten Bedingungen Konkurrenzfähigkeit mit anderen Anlagentypen zu erreichen ist. An dieser Stelle sei hierzu nur gesagt, daß ein Minimalbereich der Anlagenkapazität (ausgedrückt z. B. in Megaradtonnen pro Jahr) überschritten werden muß und daß alle bisher betriebenen Brennelementanlagen diesen Bedingungen nicht entsprechen.

Zweifellos werden allerdings solche Länder, die heute über genügend andere, technologisch leichter handhabbare Strahlungsquellen verfügen — und das sind gerade diejenigen Länder, die am meisten zur Entwicklung der Brennelementanlagen beigetragen haben — vom Einsatz dieses Anlagentyps kaum noch Gebrauch machen.

Dagegen bleibt es den Ländern, die sich um die Schaffung einer größeren Bestrahlungskapazität noch bemühen müssen, vorbehalten, die gesammelten Erfahrungen zu nutzen und Brennelementanlagen durch optimale Ausführungsform und Betriebsart wirtschaftlich rentabel einzusetzen. Daß derartige Überlegungen aktuell sind, zeigt das intensive Interesse, welches verschiedenen Ländern den vorliegenden Untersuchungsergebnissen und den Betriebserfahrungen der Anlage GARR widmen.

Empfangen am 7. 11. 1969

9. Literatur

- [1] Proc. Conf. on Radiation Sterilization of Medical Supplies, Stockholm, Apr. 1965.
- [2] Proc. First Int. Symp.: Use of Ion. Radiation for the Ster. of Med. Prod., Taylor and Francis Ltd., London 1964.
- [3] Proc. Symp. on Radiosterilization of Medical Products, Budapest, June 1967, IAEA, Vienna, SM-92.
- [4] Radiation Chemistry; Proc. of the Symposium of Theory, Sept. 1962, Budapest 1962.
- [5] *A. Chapiro*, Radiation Chemistry of Polymeric Systems, Hoch Polymers, Vol. 15, New York/London 1962.
- [6] *E. Rezer, L. Wackel*, Chemische Veränderungen von Stoffen durch energiereiche Strahlung, Leipzig 1965.
- [7] Ionizing Radiation Applications in the Chemical and Allied Industries; Proc. of Symp., London, Sept. 1967.
- [8] Proc. Symp. on Food Irradiation, by IAEA and FAO, Karlsruhe 1966, IAEA, Vienna 1966, SM-73.
- [9] *K. Uhlig*, Isotopenpraxis 3 (1967), S. 301 und 315.
- [10] *A. Brynjolfsson, N. W. Holm u. a.*, Proceedings of Conference on Industrial Uses of Large Radiation Sources, IAEA, Vienna 1963, Vol. 2, 281.
- [11] *C. W. Miller*, Radiation Sources, ed. by *A. Charlesby*, (1961), S. 197.
- [12] *P. Iere, F. Pál*, Symp. on Radiosterilization of Medical Products, Budapest, Juni 1967, IAEA, Vienna, SM 92-32.
- [13] *E. L. Foster, D. R. Drury II, A. J. Gale*, Nucleonics 11 (1953) No. 10, S. 14.
- [14] *K. H. Peter*, Medizin. Markt/Acta Medientechnica 10 (1962), S. 162, 512.
- [15] *E. A. Berrall*, Radiation Sources, ed. by *A. Charlesby*, Pergamon Press, 1961, S. 85.
- [16] *J. A. Knudsen, R. G. Mahn, J. W. Ranill*, Nucleonics 11 (1953), No. 11, S. 61.
- [17] *H. F. Wendendorp*, Radiation Sources, ed. by *A. Charlesby*, 1961, S. 171.
- [18] *D. A. Drögeler*, Nuclex 66, Basel, Sept. 1966, Techn. Meeting, No. 9b, 9/21.
- [19] *H. Binner*, Exp. Tech. Physik 12 (1961), S. 218.
- [20] *J. T. Peoples, J. D. Henderson, J. T. Prud'homme*, Nuclex 66, Basel, Sept. 1966, Techn. Meet., No. 9b, 9/21.
- [21] *G. Reinhold*, Nuclex 66, Basel, Sept. 1966, Techn. Meet., No. 9b, 9/22.
- [22] Lieferprogramm der High Voltage Engineering Corporation, USA (Beschleunig.).
- [23] Lieferprogramm von Technospeport, UdSSR (Beschleuniger).
- [24] Lieferprogramm der AECL, Canada (Co⁶⁰-Anlagen).
- [25] *S. Jefferson, C. Crawford*, Symp. on Radiosterilization of Medical Products, Budapest, June 1967, IAEA, Vienna, SM-92-31.
- [26] *M. G. Brown*, Symp. on Radiosterilization of Medical Products, Budapest, June 1967, IAEA, Vienna, SM-92-33.
- [27] *M. Michalik*, Proc. of Conf. on Large Radiation Sources in Industry, Warsaw 1959, IAEA, Vienna 1960, Vol. 2, 363.
- [28] *H. D. Heinze, E. O. Hoffmann*, Kerntechnik 3 (1961), S. 170.
- [29] *P. A. S. Howe*, Nuclex 66, Basel, Sept. 1966, Techn. Meet., No. 9a, 9/1.
- [30] *H. D. Huines*, Nuclex 66, Basel, Sept. 1966, Techn. Meet., No. 9a, 9/4.
- [31] *T. Granovall*, Symp. on Food Irradiation, Karlsruhe 1966, IAEA, Vienna 1966, SM 73-16.
- [32] *H. Burvesky*, Symp. on Food Irradiation, Karlsruhe 1966, IAEA, Vienna 1966, SM 73-11.
- [33] *P. Farrell*, Nuclex 66, Basel, Sept. 1966, Techn. Meet., No. 9b, 9/25.
- [34] *J. J. Wandlock u. a.*, USAEC Rep. IAI 203, Dec. 1962.
- [35] *J. L. Hanbille*, Int. J. Appl. Radiat. Isotopes 13 (1962), S. 283.
- [36] *H. Manowitz u. a.*, 2. Conf. IAEA, Geneva 1959, Vol. 29, P. 1009.
- [37] *J. Ch. Berger u. a.*, Proc. of Conf. on Large Radiation Sources in Industry, Warsaw 1959, IAEA, Vienna 1960, Vol. 2, 35.
- [38] *J. S. Hubach u. a.*, Proc. of Conf. on Industrial Uses of Large Radiation Sources, Salzburg 1963, IAEA, Vienna 1963, Vol. 2, 175.
- [39] *P. Hartok, S. Joubert*, 2. Conf. IAEA, Geneva 1959, Vol. 29, P. 1700 und Vol. 7, P. 110.
- [40] *R. E. R. Coeckelberg u. a.*, 2. Conf. IAEA, Geneva 1959, Vol. 29, P. 1895.
- [41] *H. Baur*, Atomkernenergie 6 (1961), S. 125.

