



Material informacyjny

opracowany przez Departament Energii Jądrowej

Ministerstwa Energii

Wrzesień 2017

ENERGIA JĄDROWA UMOŻLIWIA BADANIA KOSMOSU

Badania kosmosu wymagają stosowania niezawodnych i działających przez wiele lat źródeł energii do zasilania urządzeń pokładowych i przyrządów pomiarowych w trakcie misji badawczych, realizowanych w przestrzeni kosmicznej i na innych planetach. Niezawodne zasilanie takich urządzeń może zagwarantować jedynie energia wyzwalana w procesie rozpadu promieniotwórczego.

1. RADIOIZOTOPOWY GENERATOR TERMoeLEKTRYCZNY

Radioizotopowy generator termoelektryczny (*Radioisotope thermoelectric generator*, RTG) jest urządzeniem przeznaczonym do wytwarzania prądu, w którym źródłem energii jest rozpad izotopu promieniotwórczego, a wydzielone w ten sposób ciepło zamieniane jest następnie w energię elektryczną.

W generatorze RTG materiał promieniotwórczy (paliwo) jest umieszczony w pojemniku, do którego wprowadzone jest jedno złącze ogniwa termoelektrycznego (termopary). Drugie złącze termopary wprowadzone jest do czynnika chłodzącego (np. przyłączone do radiatora). Rozpad promieniotwórczy jest źródłem energii termicznej, która podgrzewa jeden koniec termopary. Różnica temperatur między złączami, w wyniku efektu Seebecka, wywołuje siłę elektromotoryczną (termoelektryczną) i powoduje przepływ prądu w układzie zasilanym generatorem RTG. Większe różnice temperatur powodują wytworzenie większej mocy.

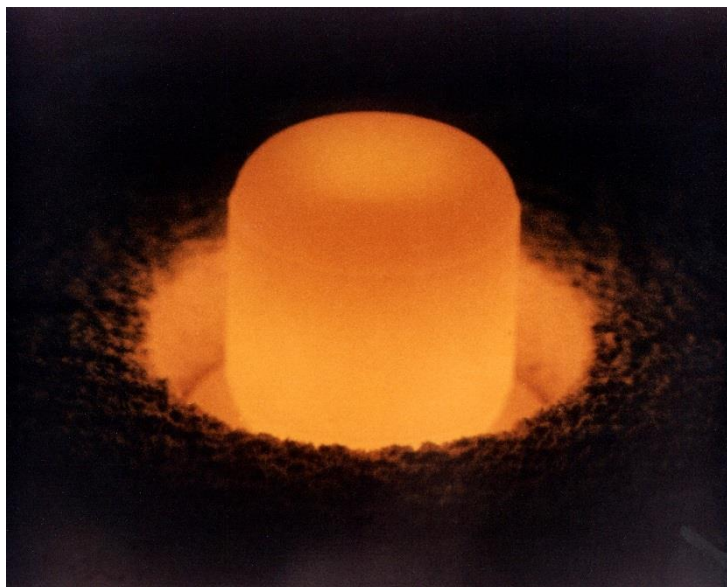
Materiał promieniotwórczy stosowany w generatorze jako paliwo musi spełniać kilka warunków:

- Okres połowicznego zaniku musi być na tyle długi, aby moc generatora nie malała szybko wraz z upływem czasu i jednocześnie nie może być zbyt długi, aby liczba rozpadów w jednostce czasu nie była za mała do generacji wystarczającej ilości ciepła.
- Musi mieć możliwie dużą gęstość, żeby nie zabierać przestrzeni, która może być wykorzystana choćby na pomieszczenie dodatkowej aparatury badawczej.
- Paliwo nie powinno emitować promieniowania o wysokiej przenikliwości wymagającego dodatkowych osłon (γ , X czy β). Optymalne jest promieniowanie α , ponieważ najlepiej przetwarza się na ciepło i praktycznie nie wymaga osłon.
- Produkty rozpadu są także często promieniotwórcze i powinny spełniać wszystkie powyższe założenia.

Wszystkie te warunki ograniczają liczbę potencjalnych izotopów do 30. Najczęściej stosowane są izotopy plutonu (^{238}Pu), kiuru (^{244}Cm) i strontu (^{90}Sr). Poza tym używane są ^{210}Po , ^{241}Am , ^{147}Pm ,



^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{60}Co , ^{242}Cm oraz izotopy tulu (Tm). Spośród wymienionych pluton-238 ma długi okres półrozpadu (87,7 lat), stosunkowo wysoką wydajność termiczną (0,57 W/g) i najniższe wymagania co do osłon. Wymaga osłony grubości jedynie kilku mm lub wcale (wystarczy obudowa samego generatora). Z tych powodów pluton-238 jest najczęściej używanym izotopem w generatorach RTG. Stront-90 ma krótszy czas rozpadu (29 lat), niższą wydajność i emituje promieniowanie beta, ale jest dużo tańszy. Używany w pierwszych konstrukcjach polon-210 posiada dużą wydajność (140 W/g), ale ma bardzo krótki czas półrozpadu (139 dni) i emituje promieniowanie gamma. Izotop ^{241}Am posiada okres półrozpadu wynoszący 432 lata, więc teoretycznie może zasilać generator przez setki lat. Jednak jego wydajność to około 1/4 wydajności plutonu-238, a poza tym emituje więcej promieniowania gamma. Pod względem wymagań ekranowania (potrzebuje ekranów ołowianych grubości około 2 cm) stawia go to na drugim miejscu po plutonie-238.



Fot. 1 Pastylka z plutonu-238 (PuO_2) rozgrzana do czerwoności pod wpływem własnego promieniowania.

2. ZASTOSOWANIE GENERATORÓW RTG

Generatory RTG są używane głównie jako źródła zasilania w satelitach, pojazdach kosmicznych i nienadzorowanych urządzeniach pracujących zdalnie (boje, latarnie morskie, stacje radarowe itp.) oraz rozrusznikach serca.

BADANIA KOSMOSU

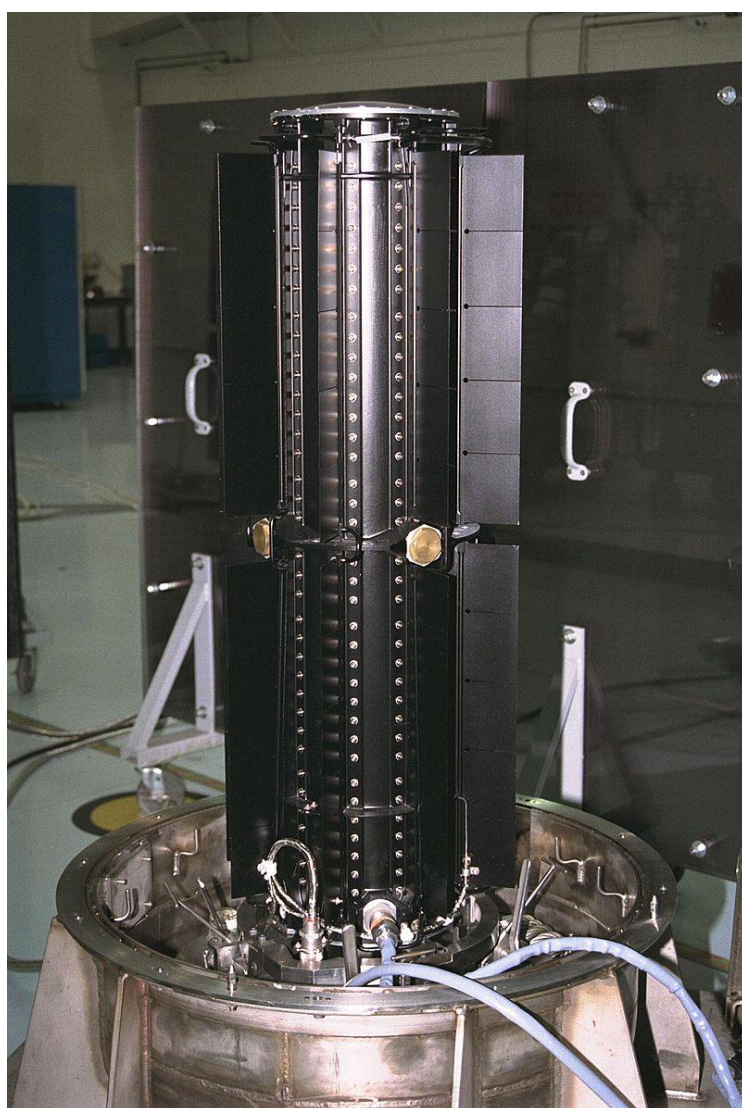
Powszechnym zastosowaniem generatorów RTG jest zasilanie różnych pojazdów kosmicznych w energię elektryczną (*Systems for Nuclear Auxiliary Power- SNAP*). RTG były z powodzeniem używane niemal od początku misji kosmicznych. Obecnie stosowane baterie słoneczne wystarczają do zasilania pojazdów kosmicznych jedynie do orbity Jowisza, są one także bezużyteczne w okresie panowania nocy na badanej planecie lub księżycu, a także łatwo podlegają zanieczyszczeniu pyłem naniesionym przez wiatr. Dalsze misje oraz lądowanie na planetach wymagać będą stosowania źródeł jądrowych do zasilania i ogrzewania aparatury pokładowej



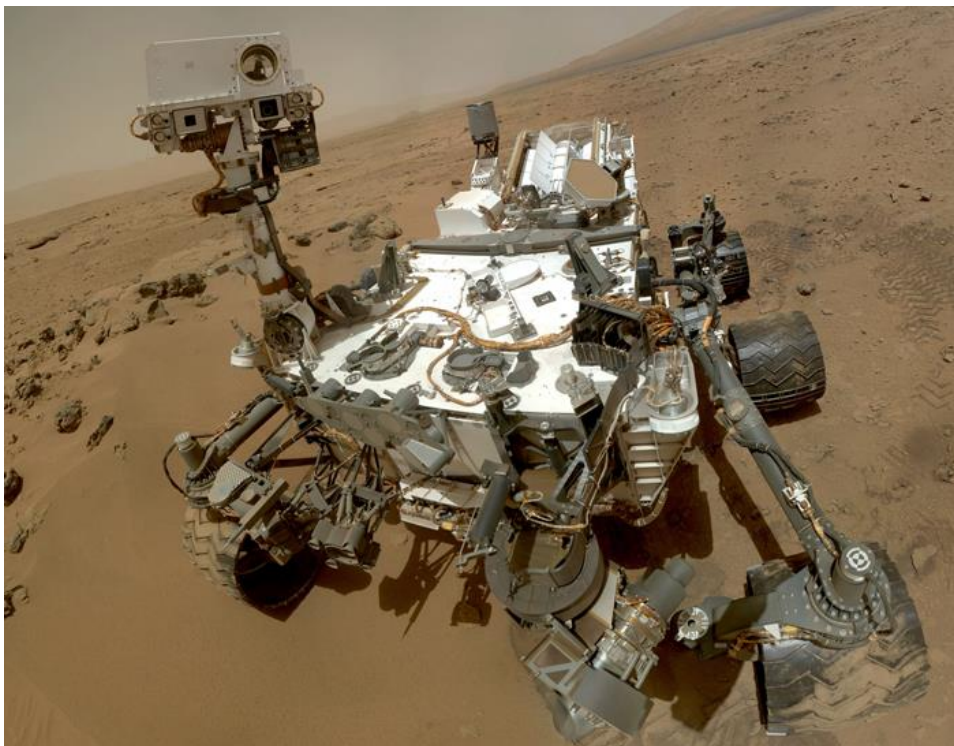
zainstalowanej w tych sondach. **Energia ze źródeł promieniotwórczych jest niezbędna do dalszego rozwoju badań kosmicznych.**

Stany Zjednoczone użyły po raz pierwszy RTG typu SNAP 3B w satelicie nawigacyjnym Transit 4A w 1961 roku. Generator ten zawierał 96 gramów izotopu plutonu-238.

RTG są używane przede wszystkim w statkach kosmicznych, które podróżują na tyle daleko od Słońca, że baterie słoneczne nie spełniają już swojego zadania. Zostały użyte w sondach *Pioneer 10*, *Pioneer 11*, *Voyager 1*, *Voyager 2*, *Galileo*, *Ulysses*, *Cassini-Huygens*, *New Horizons*, *Viking*, misjach programu *Apollo 12-17* oraz zasilają pojazd *Curiosity*, który od 2012 bada powierzchnię Marsa (*Mars Science Laboratory MSL*).



Fot. 2. Generator RTG w sondzie *Cassini*



Fot. 3. Generator RTG w pojeździe marsjańskim *Curiosity*

Nazwa, Model	Pojazd (liczba RTG)	Wydajność		Izotop	Masa paliwa [Kg]	Masa RTG [Kg]	Stosunek mocy do masy [W/kg]
		Elektryczna [W]	Ciepłota [W]				
MMRTG	MSL/ <i>Curiosity</i> rover	c. 110	c. 2000	²³⁸ Pu	c. 4	<45	2.4
GPHS-RTG	<i>Cassini</i> (3), <i>New Horizons</i> (1), <i>Galileo</i> (2), <i>Ulysses</i> (1)	300	4400	²³⁸ Pu	7.8	55.9–57.8	5.2-5.4
MHW-RTG	LES-8/9, <i>Voyager 1</i> (3), <i>Voyager 2</i> (3)	160	2400	²³⁸ Pu	c. 4.5	37.7	4.2
SNAP-3B	Transit-4A (1)	2.7	52.5	²³⁸ Pu	?	2.1	1.3
SNAP-9A	Transit-5BN1/2 (1)	25	525	²³⁸ Pu	c. 1	12.3	2.0
SNAP-19	Nimbus-3 (2), Pioneer 10 (4), Pioneer 11 (4)	40.3	525	²³⁸ Pu	c. 1	13.6	2.9
modified SNAP-19	Viking 1 (2), Viking 2 (2)	42.7	525	²³⁸ Pu	c. 1	15.2	2.8
SNAP-27	Apollo 12–17 ALSEP (1)	73	1,480	²³⁸ Pu	3.8	20	3.65

Tab. 1. Generatory RTG w misjach kosmicznych



INSTALACJE NAZIEMNE

Oprócz lotów kosmicznych generatory RTG jako stałe i niezawodne źródło energii znalazły także zastosowanie do zasilania bezobsługowych urządzeń nawigacyjnych w odległych, niedostępnych regionach Ziemi.

Związek Radziecki rozmieścił ok 1000 generatorów RTG w latarniach morskich i bojach nawigacyjnych w rejonie Arktyki. Jako źródło energii wykorzystywany był izotop strontu ^{90}Sr z uwagi na niski koszt jego produkcji. W trakcie eksploatacji tych latarni w wyniku braku nadzoru nastąpił proces ich dewastacji i kradzieży materiału promieniotwórczego. Należą one do kategorii źródeł porzuconych (*orphaned sources*) i stanowią zagrożenie proliferacyjne. Wiele z nich zostało nielegalnie rozmontowanych w celu odzyskania metalu z osłony i mogą stać się potencjalnym źródłem materiału promieniotwórczego dla terrorystów. W dodatku części z tych obiektów trudno jest odnaleźć z powodu braku lub utraty informacji dotyczących ich położenia.

Także Stany Zjednoczone wykorzystują generatory RTG w swoich odległych obiektach w rejonie Alaski, gdzie służą do dostarczania energii w bazach obserwacyjnych i wczesnego ostrzegania.

Wielka Brytania również zasilala w przeszłości generatorami RTG latarnie morskie i boje nawigacyjne w rejonie wybrzeża Irlandii. Są one obecnie demontowane i utylizowane.

Nazwa, Model	Zastosowanie	Wydajność		Izotop	Masa paliwa [Kg]	Masa urządzenia [Kg]
		Elektryczna [W]	Ciepłota [W]			
Beta-M	Radzieckie/rosyjskie bezobsługowe latarnie morskie i boje nawigacyjne w rejonie Arktyki	10	230	^{90}Sr	0.26	560
Efir-MA		30	720	?	?	1250
IEU-1		80	2200	?	?	2500
IEU-2		14	580	?	?	600
Gong		18	315	?	?	600
Gorn		60	1100	^{90}Sr	?	1050
IEU-2M		20	690	?	?	600
IEU-1M		120 (180)	2200 (3300)	?	?	2(3) × 1050
Sentinel 25	Amerykańskie stacje radarowe i sejsmiczne na Alasce	9–20		SrTiO_3	0.54	907–1814
Sentinel 100F		53		Sr_2TiO_4	1.77	1234
RIPPLE X	Boje, Latarnie morskie na wybrzeżu Irlandii	33		SrTiO_3		1500

Tab. 2. Generatory RTG do zasilania nieobsługiwanych instalacji na Ziemi



Fot. 4 . Generator RTG RIPPLE X



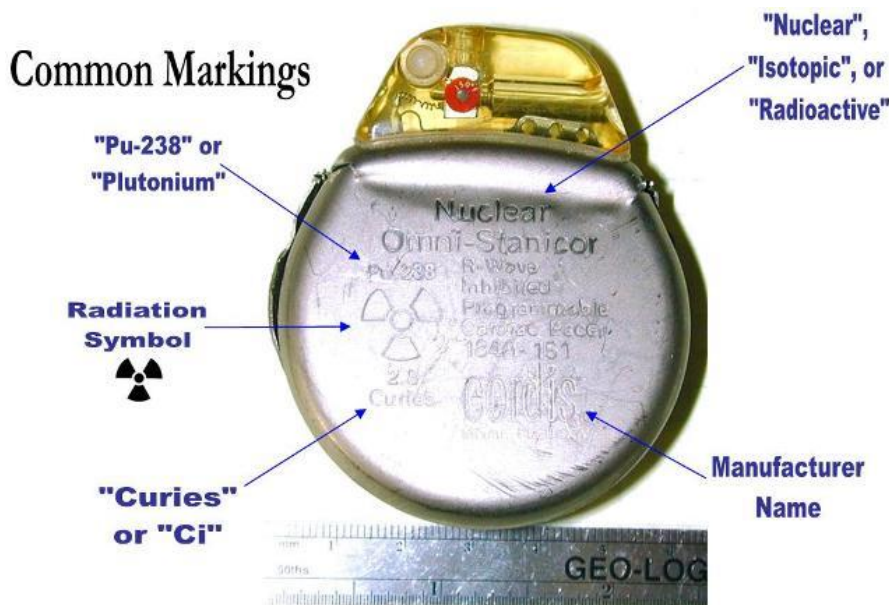
Fot. 5. Niszczące generatory RTG zdemontowane z radzieckich/rosyjskich latani morskich w oczekiwaniu na transport do zakładu utylizacji

INNE ZASTOSOWANIA

Miniaturowe wersje generatorów RTG zasilane izotopem ^{238}Pu były stosowane w rozrusznikach serca. Stwarzało to pewne zagrożenie w przypadku kremacji po śmierci właściciela bez



wcześniejszego usunięcia baterii z ciała. Dlatego też obecne rozruszniki są zasilane bateriami wykonanymi w innych technologiach.



Fot. 6. Rozrusznik serca pracujący w oparciu o izotop ^{238}Pu

3. ENERGETYKA JĄDROWA NA RZECZ PODBOJU KOSMOSU

Brytyjskie narodowe centrum badań jądrowych (*National Nuclear Laboratory* – NNL) podpisało kontrakt o wartości 3 mln £ z europejską agencją kosmiczną (*European Space Agency* – ESA), w ramach którego ma ono dostarczyć radioizotop ameryk-241 przeznaczony do zasilania badawczych sond kosmicznych.

Wielka Brytania jako jedno z nielicznych państw (obok Francji, Rosji, Chin i Indii) posiada zamknięty jądrowy cykl paliwowy i w swoich zakładach w Sellafield prowadzi przerób wypalonego paliwa pochodzącego zarówno z rodzimych jak i zagranicznych reaktorów jądrowych. Pluton odzyskiwany w tym procesie (składa się głównie z izotopów Pu-239 i Pu-241) służy następnie do produkcji paliwa MOX. Ponieważ produkcja takiego paliwa napotykała dotychczas w Wlk. Brytanii na szereg problemów technicznych na terenie obiektu Sellafield zgromadzono znaczną ilość (ok. 123 ton) plutonu oczekującego na dalsze zagospodarowanie.

Zgromadzony dotychczas zapas plutonu ulega procesowi starzenia i zostaje zanieczyszczony izotopem ameryku-241 pochodzącym z rozpadu β izotopu Pu-241. W trakcie przechowywania plutonu, nagromadzony w nim Am-241 ulega rozpadowi α do Np-237, czemu towarzyszy promieniowanie γ . Po długim okresie składowania nagromadzony w plutonie Am-241 wywołuje w nim zbyt dużą aktywność γ aby materiał ten mógł być następnie wykorzystany do produkcji paliwa MOX. W przypadku zakładów Sellafield okres ten wynosi 6 lat (pluton zawiera ponad 3% Am-241) i po takim czasie nie można wykorzystywać zgromadzonego plutonu bez uprzedniego usunięcia domieszki zaśmiecającego go Am-241.



Usunięty odpadowy izotop ameryku znajdzie zastosowanie w badaniach kosmicznych. Zgodnie z podpisanym kontraktem NNL zamierza w ciągu dwóch lat uruchomić eksperymentalną produkcję pastylek z Am-241, które zostaną następnie wykorzystane przez europejską agencję kosmiczną do produkcji radioizotopowych źródeł zasilania sond kosmicznych (*Radioisotope Power Sources - RPS*).

Dotychczas standardowym źródłem zasilania aparatury sond i próbników kosmicznych są radioizotopowe generatory termoelektryczne wykorzystujące jako źródło ciepła izotop Pu-238.

ESA uważa Am-241 za bardziej atrakcyjne źródło ciepła ponieważ jest on o wiele tańszy od Pu-238 mimo iż jego wydajność termiczna wynosi jedynie 115 W/kg i cechuje go większa aktywność promieniowania γ . Okres połowicznego zaniku Am-241 wynosi 432 lata co będzie umożliwiać wykonywanie dłuższych lotów (88 lat dla Pu-238). Ponadto izotop Pu-238 jest obecnie prawie niedostępny na rynku – USA zaprzęstały jego produkcji w 1988 r., również Rosja przestała go sprzedawać. Dotychczas Pu-238 wytwarzany był jako produkt uboczny przy produkcji plutonu do celów zbrojeniowych. Po zaprzestaniu produkcji w 1998 roku USA kupowały Pu-238 od Rosji w cenie 45 000 USD za uncję. Zapas Pu-238, jakim dysponuje obecnie NASA wynosi ok. 18 kg. Wystarczy to do prowadzenia ograniczonych badań kosmicznych jedynie do końca bieżącej dekady.

Sondy kosmiczne podobne do *Cassini*, *Voyager* i *Galileo*, które zasilane są generatorami RTG, zawierającymi ok. 30 kg Pu-238, będą potrzebować więcej Am-241, mimo iż sprawność generatorów znacznie wzrosła w ostatnim okresie. Zasilanie pojazdu marsjańskiego *Curiosity* wymagać będzie 15-20 kg Am-241 – zamiast ok. 4 kg Pu-238, zawartego obecnie w generatorze typu MMRTG o mocy 2 kW (termicznej) i 110 W (elektrycznej). Do produkcji 10 kg Am-241 niezbędne jest użycie ok. 250 kg plutonu z przerobu wypalonego paliwa jądrowego.

Potencjalne zapotrzebowanie na Am-241 do zastosowań kosmicznych będzie znacznie większe, niż to obecne - do zastosowań w detektorach dymu (0,3 mikrogram). Jeden gram tlenku ameryku dostarcza wystarczającej ilości aktywnego materiału dla 3 mln detektorów dymu, jego koszt wynosi 1500 USD/gram. Ostateczna decyzja o skali produkcji w NNL zależy będzie od jej kosztów i zapotrzebowania na Am-241. Wg ocen ekspertów ESA budowa zakładów produkcji Am-241 o wydajności 10 kg/rok, ich działanie przez 10 lat i końcowy demontaż pochłonie jedynie dziesiątki mln USD, podczas gdy budowa podobnego zakładu produkcji Pu-238 pochłonęłaby setki mln USD.

ESA spodziewa się, że zastosowanie tańszego Am-241 zamiast Pu-238 umożliwi dostęp do badań kosmicznych innym państwom, nie tylko USA i Rosji.

Badania kosmiczne nie są jedynym możliwym obszarem zastosowania Am-241. Naukowcy z NNL twierdzą, że zawsze będzie występować zapotrzebowanie na różne urządzenia wymagające niezależnego, stałego zasilania w energię przez okres 20-30 lat w niedostępnych lokalizacjach takich jak: głębiny morskie czy głębokie odwierty na polach naftowych. Materiał ten pochodzący z „odpadów” energetyki jądrowej może stać się dochodowym produktem eksportowym dla Wielkiej Brytanii.