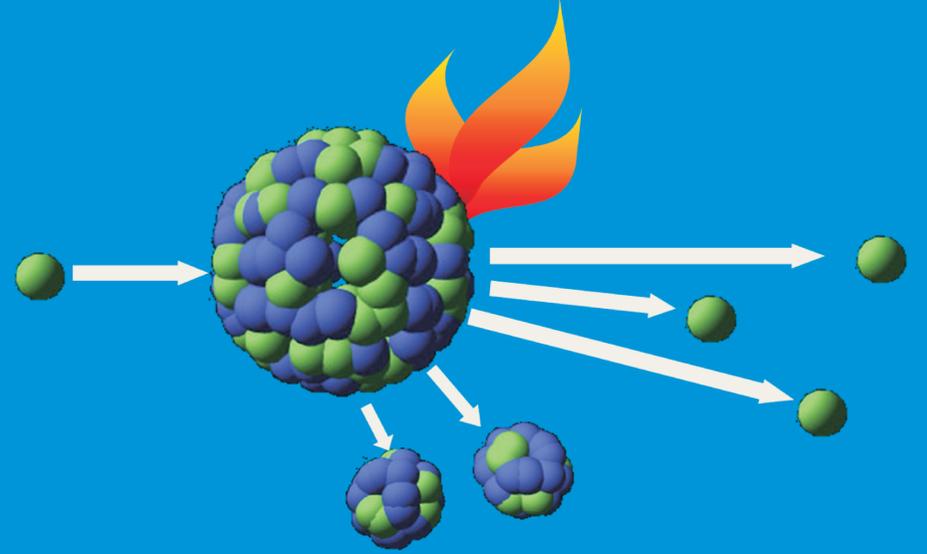


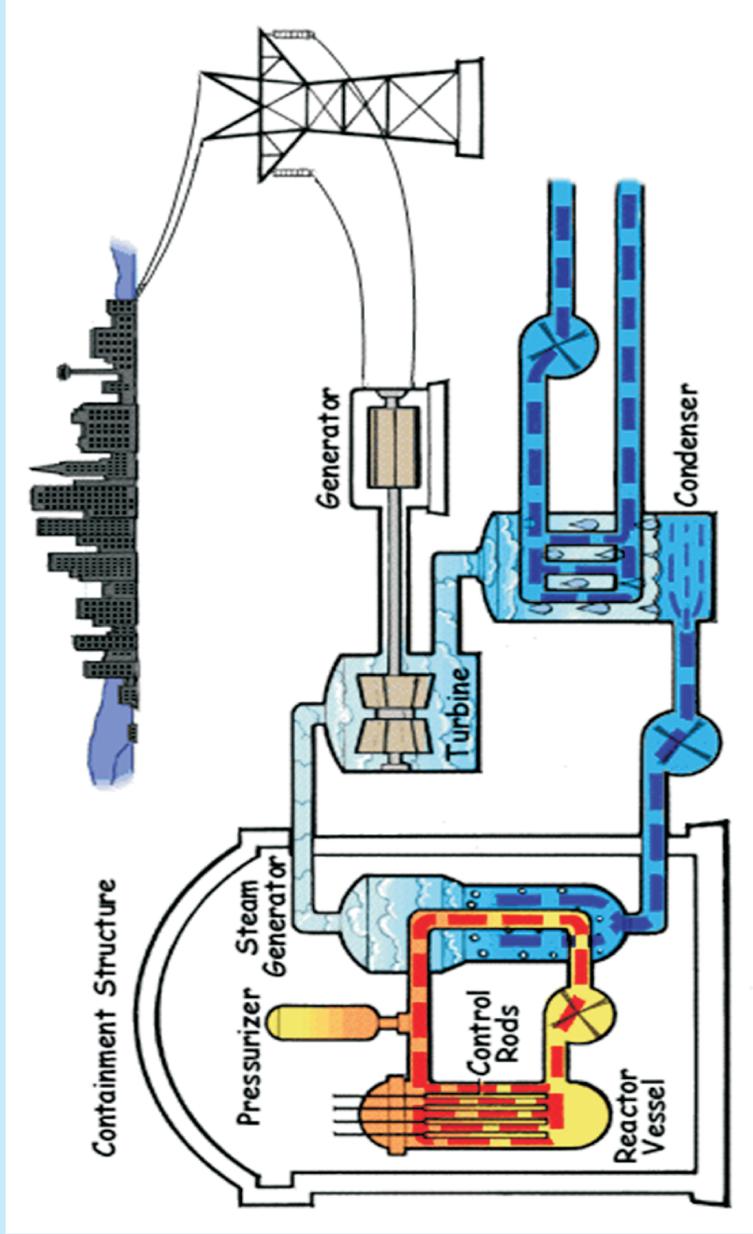
मुद्रक : भैरवी प्रिंटिंग प्रेस, वडाळा, मुंबई - ४०० ०३१.

# आणुऊर्जावद्दल कुतूहल



डॉ. राजीव चिटणीस  
मराठी विज्ञान परिषद, मुंबई

# Nuclear Power Schematic



(१) वीजनिर्मितीसाठी वापरल्या जात असलेल्या प्रचलित पद्धती कोणत्या आहेत?

आपली वीजेची गरज ही वेगवेगळ्या स्वरूपाची असते. उदाहरणार्थ, आपल्या मनगटावरच्या घड्याळातली विजेची गरज ही अत्यल्प असते व ती छोट्याशा बटण-सेलने भागू शकते. याउलट एखाद्या शहराला वीज पुरवठा करायचा असेल तर त्यासाठी मोठ्या प्रमाणावर वीज निर्माण करावी लागते. ही मोठ्या प्रमाणावरची विजेची निर्मिती मुख्यतः औष्णिक, जलविद्युत आणि अणुऊर्जा प्रकल्पांद्वारे केली जाते.

विद्युतनिर्मितीसाठी वापरली जाणारी मुख्य यंत्रणा ही या तीनही प्रकारच्या प्रकल्पांत जवळपास सारख्या पद्धतीची असते. या सर्व प्रकल्पांत जो मुख्य विद्युतनिर्मिती संच (म्हणजे जनित्र) बसवलेला असतो, त्यात वीजवाहक तारांचं वेटोळं वापरलं जातं. या वेटोळ्याभोवती चुंबक बसवून तिथे चुंबकीय क्षेत्र निर्माण केलं जातं. तारेचं वेटोळं हे एका दांड्याला जोडलेलं असून दांड्याच्या दुसऱ्या टोकाला चक्कीसारखी यंत्रणा जोडलेली असते. ही चक्की फिरली की दांडा फिरतो. दांडा फिरला की त्याच्या टोकाला जोडलेलं तारेचं वेटोळं फिरतं. हे तारेचं वेटोळं चुंबकीय क्षेत्रात वसलेलं असल्यामुळे त्यात वीजेचा प्रवाह निर्माण होऊन वीजेची निर्मिती होते.

वीज निर्माण करण्यासाठी ही जी जनित्राला जोडलेली चक्की फिरवावी लागते, ती प्रत्येक पद्धतीनुसार वेगवेगळ्या प्रकारे फिरवली जाते. जलविद्युत प्रकल्पात ही चक्की फिरवण्यासाठी धरणात साठवलेलं पाणी वापरलं जातं. धरणाच्या दरवाजातून अतिशय वेगाने येणारं हे पाणी चक्कीच्या पात्याला जोरात ढकलतं व त्यामुळे ती चक्की फिरायला लागून वीजनिर्मिती होऊ लागते. औष्णिक प्रकल्पांत दगडी कोळसा वा नैसर्गिक वायुसारखं एखादं इंधन जाळून पाण्याचं रूपांतर वाफेत केलं जातं. ही वाफ चक्कीच्या पात्यांना ढकलते व चक्कीला गती मिळून

वीजेची निर्मिती होते. अणुऊर्जा प्रकल्पातली वीजनिर्मिती ही अशाच प्रकारे वाफेद्वारे चक्की फिरवून केली जाते. ही वाफ निर्माण करण्यासाठी लागणारी उष्णता केंद्रकीय क्रियांद्वारे निर्माण केली जाते.

(२) वीजनिर्मितीसाठी कोणत्या अपारंपारिक पद्धती वापरल्या जातात?

वीजनिर्मितीसाठी वापरल्या जाणाऱ्या अपारंपारिक पद्धतींत सौरऊर्जा, पवनऊर्जा, सागरीऊर्जा, भूऊर्जा, इत्यादींचा वापर वीजनिर्मितीसाठी केला जातो. यातील बहुतेक पद्धती या प्रदुषणापासून मुक्त आहेत. सौरऊर्जेचा वापर करताना एकतर विशिष्ट प्रकारच्या (फोटोवोल्टाईक) सेल्स वापरून सौरऊर्जेचे रूपांतर थेट विद्युतऊर्जेत केले जाते, किंवा आरशाच्या साहाय्याने सूर्यकिरण एकत्रित करून मिळणाऱ्या उष्णतेद्वारे पाण्याची वाफ निर्माण केली जाते. या वाफेद्वारे जनित्राची चक्की फिरवून वीजनिर्मिती केली जाते. पवनऊर्जेच्याबाबतीत वाऱ्याद्वारे जनित्राची चक्की फिरवून वीज निर्माण केली जाते.

दिवसातून दोनदा येणाऱ्या भरती-ओहोटीचा वापरही विजेच्या निर्मितीसाठी केला जातो. भरती-ओहोटीच्या वेळी किनाऱ्याच्या दिशेने किंवा विरुद्ध दिशेने होणाऱ्या पाण्याच्या हालचालीचा वापर करून जनित्र चालवले जाते आणि त्याद्वारे विद्युतनिर्मिती होते. काही ठिकाणी समुद्रकिनाऱ्यावर लांबच लांब बांध घालून भरतीच्या वेळचं पाणी बांधाच्या किनाऱ्याकडील बाजूस जमा केले जाते, तर ओहोटीच्या वेळी हे जमा केलेले पाणी समुद्रात सोडले जाते. बांधातील नलिकांमधून होणाऱ्या पाण्याच्या या हालचालीचा वापर करून जनित्राद्वारे वीज निर्मिती केली जाते.

उष्णकटिबंधातील समुद्राच्या पृष्ठभागाजवळील पाण्याचं तापमान हे पंचवीस अंश सेल्सियसहून अधिक असतं, तर एक किलोमीटर खोलीवरील

पाण्याचं तापमान हे पाच ते दहा अंश सेल्सियस इतकं कमी असतं. या उष्ण आणि थंड पाण्याच्या मदतीने अमोनियासारख्या सहज बाष्पीभूत होणाऱ्या एखाद्या द्रवपदार्थाचं रूपांतर आलटून पालटून वायू आणि द्रवात केलं जातं. पदार्थाचं वायुत रूपांतर झाल्यानंतर प्रसरण पावणाऱ्या या वायुद्वारे जनित्राला जोडलेली चक्की फिरून विद्युतनिर्मिती होते. भूगर्भातील उष्णतेचाही असाच वापर केला जातो. यासाठी नलिकांद्वारे जमिनीत खोलवरून पाणी फिरवून आणलं जातं. वाढत्या खोलीबरोबर वाढणाऱ्या तापमानामुळे या पाण्याचं तापमान वाढतं. या उष्ण पाण्याद्वारे अमोनियासारख्याच एखाद्या पदार्थाचं बाष्पिभवन करून जनित्र चालवलं जातं. काहीवेळा भूगर्भातून बाहेर पडणाऱ्या वाफेचाही जनित्र चालवण्यासाठी थेट वापर केला जातो.

(३) वीजनिर्मितीसाठी वापरल्या जाणाऱ्या मुख्य पद्धतीतील गुण-दोष कोणते आहेत?

वीजनिर्मितीसाठी वापरल्या जाणाऱ्या प्रत्येक पद्धतीचे गुण-दोष आहेत. औष्णिक पद्धतीत दगडी कोळसा, नैसर्गिक वायू, खनिज तेल यासारखे कार्बनयुक्त पदार्थ जाळावे लागतात. या ज्वलनक्रियेत मोठ्या प्रमाणांत कार्बन-डाय-ऑक्साईड वायुची निर्मिती होते. कार्बन-डाय-ऑक्साईड वायू हा पृथ्वीचे तापमान वाढवण्यास कारणीभूत ठरणारा मोठा घटक आहे. कोळसा जाळून निर्माण केलेल्या विजेच्या बाबतीत आपल्या वीजेच्या बिलात दाखवल्या जाणाऱ्या प्रत्येक युनिटमागे सुमारे एक किलोग्रॅम कार्बन-डायऑक्साईडची वातावरणात भर पडत असते. (नैसर्गिक वायुद्वारे निर्माण केल्या गेलेल्या वीजेच्या बाबतीत हे प्रमाण याच्या निम्मं भरतं.) दगडी कोळशाच्या ज्वलनातून कार्बन-डाय-ऑक्साईडबरोबरच गंधक आणि नायट्रोजन यांची ऑक्सिजनबरोबरची वायुरूपी घातक संयुगं सुद्धा लक्षणीय प्रमाणांत निर्माण होतात. कोळशाच्या ज्वलनातून मोठ्या

प्रमाणावर निर्माण होणारी राख ही वातावरणात शिरून आजुबाजूच्या परिसराचं मोठ्या प्रमाणावर नुकसान करू शकते.

जलविद्युत प्रकल्पात कोणतंही रासायनिक प्रदुषण घडून येत नाही. मात्र जलविद्युत प्रकल्पांत पाण्याच्या पुरवठ्यातील चढ-उतार हे वीजनिर्मितीवर परिणाम घडवू शकतात. तसंच जलविद्युत प्रकल्प उभारण्यासाठी जागांची निवडही काटेकोरपणे करावी लागते. या प्रकल्पांसाठी धरणं उभारायला लागणाऱ्या जागा या पाणी अडण्याच्या दृष्टीने सोयीच्या असल्या लागतात; त्याचबरोबर पाणी अडल्यावर निर्माण होणाऱ्या मोठ्या जलाशयामुळे त्या परिसरातील जैवविविधता किती प्रमाणात नष्ट होईल हे ही लक्षांत घ्यावं लागतं. अन्यथा पर्यावरणाच्या दृष्टीने उपकारक असणारी वीजनिर्मितीची ही पद्धत पर्यावरणाला मारक ठरू शकते.

रासायनिक क्रिया घडून येत नसल्यामुळे, अणुऊर्जेवर आधारित वीजनिर्मिती हीसुद्धा रासायनिकदृष्ट्या प्रदुषणविरहीत ठरते. अणुऊर्जेवर आधारित वीजनिर्मितीदरम्यान किरणोत्सारी कचरा निर्माण होत असल्याने या कचऱ्याची योग्य प्रकारे विल्हेवाट लावणं हे मात्र गरजेचं असतं. कोळसा, नैसर्गिक वायू यासारख्या इंधनांच्या तुलनेत अणुइंधनाची ऊर्जानिर्मितीची क्षमता ही मुळातच खूप मोठी असते. शिवाय अणुइंधनाचा पुनर्वापरही करता येत असल्यामुळे अणुइंधन हे कार्बनयुक्त इंधनांपेक्षा हजारोपटींनी परिणामकारक ठरतं.

(४) आपल्याकडची वीजनिर्मिती कोणकोणत्या पद्धतींद्वारे केली जाते?

भारतात आज निर्माण होणाऱ्या एकूण वीजेपैकी मोठा भाग हा औष्णिक ऊर्जेद्वारे निर्माण होणाऱ्या विजेचा आहे. औष्णिक पद्धतींनी निर्माण केल्या जाणाऱ्या वीजेचं प्रमाण हे एकूण वीज निर्मितीच्या 65

टक्के इतकं आहे. सुमारे 25 टक्के वीज ही जलविद्युत प्रकल्पांद्वारे तर 3 टक्के वीज ही अणुऊर्जेद्वारे निर्माण होते. उर्वरित 7 टक्के वीज ही पवनऊर्जा, सौरऊर्जा यासारख्या इतर अपारंपारिक स्रोतांद्वारे निर्माण होते. औष्णिक प्रकल्पांद्वारे निर्माण होणाऱ्या ऊर्जेपैकी सुमारे पांच-षष्टांश वीज (म्हणजे एकूण वीजनिर्मितीच्या 54 टक्के) दगडी कोळसा जाळून, तर सुमारे एक-षष्टांश वीज (एकूण वीज निर्मितीच्या सुमारे 10 टक्के) ही नैसर्गिक वायू जाळून निर्माण केली जाते. खनिज तेल जाळून निर्माण केल्या जाणाऱ्या वीज निर्मितीचं प्रमाण एकूण वीजनिर्मितीच्या 1 टक्क्यापेक्षा कमीच आहे.

भारतातील एकूण वीजनिर्मितीत महाराष्ट्राचा वाटा हा सुमारे १३ टक्क्यांचा आहे. यात औष्णिक प्रकल्पांद्वारे कोळसा जाळून निर्माण केलेल्या वीजेचं प्रमाण राज्यातील एकूण वीजनिर्मितीच्या ५३ टक्के इतकं आहे. नैसर्गिक वायुद्वारे निर्माण केलेल्या विजेचे प्रमाण हे १७ टक्के इतकं आहे. महाराष्ट्रात कोराडी (जि. नागपूर), नाशिक, भुसावळ, पारस (जि. अकोला), परळी (जि. बीड), खापरखेडा (जि. नागपूर), चंद्रपूर, तुर्भ (मुंबई), डहाणू (जि. ठाणे), वरोरा (जि. चंद्रपूर), इत्यादी ठिकाणी कोळशावर आधारलेली वीजनिर्मिती केंद्रे आहेत. याशिवाय उरण येथे नैसर्गिक वायुद्वारे वीजनिर्मिती केली जाते. तुर्भ येथील वीजनिर्मितीकेंद्रातही वायू जाळून काही प्रमाणात वीजउत्पादन केलं जातं.

महाराष्ट्रात जलविद्युतप्रकल्पांद्वारे होणारी विजेची निर्मिती ही सुमारे १५ टक्के आहे. यात कोयनानगरसारख्या मोठ्या प्रकल्पाबरोबर भाटघर, भिरा, भिवपुरी, येलदरी, पेंच अशा विविध ठिकाणच्या मध्यम व लहान आकाराच्या अनेक जलविद्युतप्रकल्पांचाही समावेश होतो. याबरोबरच तारापूर (जि. ठाणे) येथील अणुऊर्जेवर आधारीत वीजनिर्मिती केंद्रातून महाराष्ट्राच्या वीजपुरवठ्यात ३ टक्क्यांची भर पडते.

## (५) वीजनिर्मिती केंद्रांची क्षमता कशी मोजतात?

एक किलोग्रॅम वजनाची वस्तू दहा सेंटीमीटर वर उचलण्यास लागणारी ऊर्जा एका सेकंदात निर्माण करू शकणाऱ्या यंत्राची ऊर्जानिर्मितीची क्षमता सुमारे एक वॉट इतकी असते. आता दुसऱ्या एखाद्या मोठ्या यंत्राने दहा लाख किलोग्रॅम म्हणजे एक हजार टन वजनाची वस्तू दहा सेंटीमीटर वर उचलण्यास लागणाऱ्या ऊर्जेची निर्मिती एका सेकंदात केली, तर त्या यंत्राची क्षमता दहा लाख वॉट म्हणजेच एक हजार किलोवॉट किंवा एक मेगावॉट इतकी भरेल. वीजनिर्मिती केंद्रांची क्षमता याच मेगावॉट या एककाद्वारे मोजली जाते.

महाराष्ट्रातील सर्वात मोठे औष्णिक वीजनिर्मिती केंद्र चंद्रपूर इथे आहे. या केंद्रातील एकूण सात संचांची वीजनिर्मितीची एकत्रित क्षमता २,३४० मेगावॉट इतकी आहे. कोयना नदीवर बांधलेल्या महाराष्ट्रातील सर्वात मोठ्या जलविद्युत प्रकल्पात अठरा संचांद्वारे एकूण १,९२० मेगावॉट वीज निर्माण होऊ शकते. तारापूरच्या अणुऊर्जाकेंद्रात चार संचांद्वारे एकूण १,४०० मेगावॉट इतकी विद्युतनिर्मिती करता येते. पवनचक्कीची स्वतःची वीजनिर्मिती क्षमता कमी असली तरी महाराष्ट्रातील सुमारे २,७०० पवनचक्क्यांद्वारे २,२०० मेगावॉट वीजनिर्मिती होते.

भारताची आजची वीजनिर्मितीची एकूण क्षमता सुमारे १,७०,३०० मेगावॉट इतकी आहे. त्यात महाराष्ट्राचा वाटा २२,१०० मेगावॉट इतका आहे. ज्या वेळेत वीजेचा जास्तीत जास्त वापर होतो, त्या काळातली देशाची वीजेची गरज ही सुमारे १,२७,००० मेगावॉट आणि राज्याची गरज ही सुमारे १९,००० मेगावॉट इतकी असते. सर्व प्रकल्प सतत शंभर टक्के कार्यक्षमतेने चालू शकत नसल्याने प्रत्यक्ष वीजपुरवठ्यात तूट निर्माण होते. आजची ही तूट राष्ट्रीय स्तरावर सुमारे १२ टक्के तर राज्य स्तरावर सुमारे २५ टक्के इतकी भरते. परिणामी, आपल्याला भार-नियमनाच्या संकटाला सामोरं जावं लागतं. भविष्यात तर वीजेची गरज ही वाढतच

जाणार आहे. ही वाढती गरज भागवण्यासाठी नवे वीजनिर्मिती प्रकल्प उभारले गेले नाहीत तर परिस्थिती अधिकच कठीण होणार आहे.

(६) वीजनिर्मितीच्या दृष्टीने भारतातील साधन-संपत्तीची उपलब्धता कशी आहे?

आजच आपल्याला विजेचा तुटवडा भासत आहे. विकासाचा नियोजित दर राखायचा तर येत्या दहा वर्षांत भारतातलं विजेचं उत्पादन आजच्या तुलनेत दुप्पट, तर वीस वर्षांत चौपटीहून अधिक होणं गरजेचं आहे. विजेची ही प्रचंड गरज भागवण्यासाठी भविष्यात आपल्याला पारंपरिक पद्धतींचा अधिकाधिक वापर करावा लागणार आहेच, पण त्याबरोबरच पवनऊर्जा, सौरऊर्जा, सागरीऊर्जा यासारख्या आपल्याकडे मुबलक प्रमाणात उपलब्ध असलेल्या अपारंपारिक स्रोतांकडेही विशेष लक्ष द्यावे लागणार आहे.

पारंपरिक पद्धतींपैकी औष्णिक ऊर्जेच्या बाबतीतील साधन-संपत्तीची परिस्थिती एकूणच गंभीर आहे. जगात उपलब्ध असलेल्या एकूण दगडी कोळशाच्या साठ्यापैकी ७ टक्के कोळसा हा भारतीय भूमिखाली दडला आहे. भारतातली निम्मी वीजनिर्मिती ही कोळशावर आधारीत असल्याने, कोळशाच्या उत्पादनाच्या दृष्टीने भारताचा जगात चवथा क्रमांक लागूनही आपल्याला कोळशाची आयात करावी लागत आहे. भारतातले आजचे कोळशाचे साठे हे एक शंभर वर्षांच्या आतच संपुष्टात येणार आहेत. नैसर्गिक वायू आणि खनिज तेलाच्या बाबतीतली स्थिती याहून वाईट आहे. आजच आपण मोठ्या प्रमाणांत तेलाची आयात करित आहोत. दोन ते तीन दशकांतच आपल्याकडेचे नैसर्गिक वायू आणि तेलाचे साठे संपुष्टात येऊ शकतील. त्यानंतर आपल्याला पूर्णपणे परदेशी तेलावर आणि वायुवर अवलंबून राहायला लागेल.

जलविद्युत क्षेत्राच्या बाबतीत मात्र आपल्या एकूण संभाव्य क्षमतेपैकी आज फक्त वीस टक्के क्षमता वापरली गेली आहे. त्यामुळे भविष्यकाळातील वीजेच्या वाढत्या उत्पादनात जलविद्युत वीजेच्या निर्मितीचे प्रमाणही जास्तीत जास्त वाढवण्याचा प्रयत्न केला जाईल. अणुऊर्जापासून होणाऱ्या वीजनिर्मितीला लागणाऱ्या युरेनियम या अणुइंधनाची आपल्याकडील उपलब्धतासुद्धा मर्यादितच आहे. परंतु थोरियम हे अणुइंधन मात्र आपल्याकडे मोठ्या प्रमाणावर उपलब्ध आहे. जगातील थोरियमच्या उपलब्ध साठ्यांपैकी एक-चतुर्थांश थोरियम आपल्याकडे बाळगणाऱ्या भारताचा या बाबतीत जगात तिसरा क्रमांक लागतो. हेच थोरियम आपल्याकडील भविष्यातल्या ऊर्जानिर्मितीत महत्त्वाची भूमिका बजावण्याची शक्यता आहे.

### (७) अणुऊर्जेची निर्मिती कशी होते?

अणुऊर्जेची निर्मिती ही कोळशासारखं एखादं रासायनिक इंधन जाळून केलेल्या ऊर्जानिर्मितीपेक्षा वेगळी असते. रासायनिक इंधनाद्वारे झालेल्या ऊर्जानिर्मितीत संपूर्ण अणु सहभागी होतो, तर अणुइंधनाद्वारे झालेल्या ऊर्जानिर्मितीत फक्त अणुकेंद्रकाचा सहभाग असतो. (म्हणूनच या क्रियांना केंद्रकीय क्रिया म्हटलं जातं.) रासायनिक क्रियेत भाग घेणारी मूलद्रव्यं ही रासायनिक क्रिया घडून आल्यानंतरही आपलं अस्तित्व कायम राखतात. केंद्रकीय क्रियेत मात्र एका मूलद्रव्याच्या अणुकेंद्रकाचं रूपांतर इतर मूलद्रव्यांच्या अणुकेंद्रकांत होतं. केंद्रकीय क्रियेत भाग घेणाऱ्या घटकांचं एकत्रित वजन हे केंद्रकीय क्रियेनंतर किंचितसं कमी झालेलं असतं. कारण केंद्रकीय क्रियेत पदार्थाचं रूपांतर ऊर्जेत होतं. अणुऊर्जापासून वीजनिर्मिती करताना, केंद्रकीय क्रियांद्वारे मिळालेली ऊर्जा प्रथम पाण्याचं वाफेत रूपांतर करण्यासाठी वापरली जाते. त्यानंतर या वाफेवर जनित्र चालवलं जाऊन त्यातून वीजनिर्मिती होते. औष्णिक

वीजननिर्मितीत कार्बन-डाय-ऑक्साईडसारखे पृथ्वीचं तापमान वाढवणारे वायु निर्माण होतात. अणुऊर्जा ही अशा वायुंच्या उत्सर्जनापासून मुक्त असते.

अणुऊर्जेची मोठ्या प्रमाणावरील निर्मिती दोन प्रकारे करता येते. पहिला प्रकार हा, वजनदार अशा काही विशिष्ट अणुंच्या केंद्रकीय विखंडनावर आधारित आहे. अणुभट्टीत नियंत्रित स्वरूपात या अणुकेंद्रकांचं विखंडन घडवून (तुकडे पाडून) ऊर्जानिर्मिती केली जाते. केंद्रकीय विखंडनातून (सामान्य भाषेत अणुविखंडनातून) निर्माण होणाऱ्या ऊर्जेचं प्रमाणही प्रचंड असतं. जितकी ऊर्जा एक टन कोळसा जाळल्यावर निर्माण होते, तितकी ऊर्जा अवघ्या अर्ध्या ग्रॅम युरेनिअमसारख्या अणुइंधनात दडलेली असते. आज अस्तित्वात असलेल्या सर्व अणुभट्ट्या या केंद्रकीय विखंडनाच्या तत्वावर चालवल्या जातात. अणुऊर्जानिर्मितीचा दुसरा प्रकार हा अणुकेंद्रकांच्या संमीलनावर आधारित आहे. या प्रकारात कमी वजनाच्या काही विशिष्ट अणुकेंद्रकांचं संमीलन (एकत्रीकरण) घडवून आणलं जातं. या संमीलनाच्या क्रियेतही पदार्थाचं रूपांतर ऊर्जेत होतं. परंतु अणुसंमीलनात निर्माण होणाऱ्या ऊर्जेवर आधारलेली अणुभट्टी बांधण्यासाठी लागणारं पूरक तंत्रज्ञान अजून पूर्णपणे विकसित झालेलं नाही. त्यामुळे अशा प्रकारची ऊर्जानिर्मिती प्रत्यक्षांत येण्यास काही अवधी जावा लागेल.

(८) अणुभट्ट्यांत युरेनिअम हे इंधन म्हणून वापरण्याचं कारण काय?

अणुऊर्जा निर्माण करण्यासाठी वापरायच्या इंधनाकडून दोन निकष पूर्ण होण्याची गरज असते. पहिला निकष म्हणजे केंद्रकीय क्रियांमार्फत इंधनाद्वारे मोठ्या प्रमाणात ऊर्जा निर्माण व्हायला हवी. दुसरा निकष म्हणजे एकदा सुरु झालेली ही केंद्रकीय क्रिया - कोळसा जसा एकदा

पेटवला की संपेपर्यंत जळत राहातो त्याप्रमाणे - अखंड सुरू राहायला हवी. हे दोन्ही निकष पूर्ण करणारं युरेनिअम हे एकच इंधन निसर्गात उपलब्ध आहे. युरेनिअम हे लोह, तांबं, जस्त या सारखंच धातूच्या स्वरूपातलं मूलद्रव्य आहे. मात्र हे मूलद्रव्य अल्प प्रमाणात किरणोत्सर्गी आहे.

निसर्गात उपलब्ध असणारं युरेनिअम हे मूलद्रव्य मुख्यतः दोन प्रकारच्या अणुंचं मिश्रण आहे. या दोन्ही अणुंच्या वजनात किंचितसा फरक आहे. दोहोंच्या वजनातला हा फरक, या अणुंतील न्यूट्रॉनच्या असमान संख्येमुळे निर्माण झाला आहे. या दोन्ही अणुंचे रासायनिक गुणधर्म सारखेच असले तरी, न्यूट्रॉनच्या संख्येतील फरकामुळे या दोन्ही अणुंचे केंद्रकीय गुणधर्म वेगवेगळे आहेत. यातील कमी वजनाच्या अणुंवर जर बाहेरून न्यूट्रॉन कणांचा मारा केला, तर या अणुंच्या केंद्रकांचं विखंडन होऊन मोठ्या प्रमाणात ऊर्जा निर्माण होते. अधिक वजनाच्या युरेनिअमच्या अणुकेंद्रकांचं मात्र सहजपणे विखंडन होऊ शकत नाही. नैसर्गिक युरेनिअममध्ये कमी वजनाच्या (विखंडनक्षम असणाऱ्या) अणुंचं प्रमाण ०.७ टक्के इतकं अत्यल्प आहे.

केंद्रकीय विखंडनादरम्यान, प्रत्येक विखंडनक्रियेत दोन ते तीन न्यूट्रॉन कण उत्सर्जित होतात. हे न्यूट्रॉन कण युरेनिअमच्या कमी वजनाच्या इतर अणुकेंद्रकांचं अशाच पद्धतिने विखंडन घडवून आणतात. या दुसऱ्या फेरीत निर्माण झालेले न्यूट्रॉन कण हे युरेनिअमच्या कमी वजनाच्या आणखी अणुकेंद्रकांचं विखंडन करून ही साखळी पुढे चालू ठेवतात. अशा रीतीने विखंडनाची ही क्रिया 'स्वयंपोषित' होऊन अखंड स्वरूपात ऊर्जानिर्मिती होत राहाते. या क्षमतेमुळेच युरेनिअम या मूलद्रव्याचा अणुइंधन म्हणून अणुभट्ट्यांत वापर केला जातो.

## (९) अणुभट्टीत जड पाणी कशासाठी वापरतात?

अखंड अणुऊर्जानिर्मितीसाठी, युरेनिअमच्या केंद्रकांच्या विखंडनातून उत्सर्जित होणाऱ्या न्यूट्रॉन कणांनी युरेनिअमच्या आणखी केंद्रकांचं विखंडन घडवून आणणं अपेक्षित असतं. परंतु विखंडनातून बाहेर पडणारे न्यूट्रॉन कण हे आपल्या प्रचंड गतीमुळे अणुकेंद्रकांच्या सान्निध्यात जास्त काळ राहू शकत नाहीत व त्यामुळे विखंडनक्रिया घडून येण्यासाठी अनुकूल परिस्थिती निर्माण होत नाही. यावर उपाय म्हणजे पाणी किंवा ग्रॅफाईटसारखा पदार्थ वापरून या न्यूट्रॉन कणांची गती कमी करणं! प्रचंड गतीत असलेले न्यूट्रॉन कण हे या पदार्थाच्या अणु वा रेणूंवर आदळले की, आपल्याकडची काही ऊर्जा ते या अणु वा रेणूंना देऊन टाकतात. अशा अनेक टक्कींनंतर न्यूट्रॉन कणांची गती युरेनिअमच्या अणुकेन्द्रकांचं विखंडन परिणामकारकरीत्या घडवून आणण्याइतपत कमी होते. न्यूट्रॉन कणांची गती मंदावणाऱ्या या पदार्थांना 'मंदायक' म्हटतात.

नेहमीचं पाणी मंदायक म्हणून उपयुक्त असलं तरी त्याच्या वापरात एक अडचण येते. नेहमीच्या पाण्याचे रेणू स्वतःच न्यूट्रॉन कण शोषून घेतात. त्यामुळे न्यूट्रॉन कणांची संख्या घटते आणि विखंडन अखंडपणे होत राहाण्यासाठी अणुभट्टीत पुरेसे न्यूट्रॉन उपलब्ध होऊ शकत नाहीत. परिणामी, केंद्रकीय विखंडनाची साखळी तुटून ऊर्जानिर्मितीत अडथळा येतो. म्हणून नैसर्गिक युरेनिअम हे इंधन म्हणून वापरल्यास, साध्या पाण्याऐवजी 'जड पाणी' हे मंदायक म्हणून वापरलं जातं.

जड पाणी हे नेहमीच्या पाण्याप्रमाणेच हायड्रोजन आणि ऑक्सिजनच्या अणुंचं संयुग आहे. साध्या पाण्यातील हायड्रोजनच्या अणुंमध्ये न्यूट्रॉनचा अभाव असतो. पण जड पाणी घडवणाऱ्या हायड्रोजनच्या अणुंमध्ये प्रोटॉनच्या जोडीला एक न्यूट्रॉनही असतो. या न्यूट्रॉनयुक्त हायड्रोजनपासून बनलेलं हे जड पाणी फारसे न्यूट्रॉन कण शोषून घेत नाही. त्यामुळे जर जड पाणी हे मंदायक म्हणून वापरलं तर,

न्यूट्रॉन कणांच्या संख्येत विशेष घट होत नाही. या परिस्थितीत विखंडनासाठी न्यूट्रॉन कण पुरेशा प्रमाणात उपलब्ध होत राहून विखंडनाची साखळी पुढे चालू राहाते व ऊर्जानिर्मितीही अखंडपणे होत राहाते.

(१०) समृद्ध युरेनिअम म्हणजे काय?

युरेनिअम हे जेव्हा अणुइंधन म्हणून वापरलं जातं, तेव्हा मुख्यत्वेकरून त्यातील कमी वजनाच्या अणुकेंद्रकांच्या विखंडनातून ऊर्जा निर्मिती होते. हे विखंडन परिणामकारकरीत्या घडून येण्यासाठी त्या केंद्रकांवर आदळणाऱ्या न्यूट्रॉन कणांची गती मंदायकाद्वारे कमी करावी लागते. नैसर्गिक युरेनिअम जेव्हा इंधन म्हणून वापरलं जातं, तेव्हा जड पाणी हे मंदायक म्हणून वापरावं लागतं. जड पाणी हे न्यूट्रॉन कणांचं शोषण कमी प्रमाणात करित असल्याने, जड पाण्याच्या वापराने अणुभट्टीतील न्यूट्रॉन कणांची संख्या ही विखंडनक्रिया अखंडपणे घडण्यासाठी जितकी आवश्यक असते तितकी राखली जाते.

अणुभट्टीत साध्या पाण्याचाही मंदायक म्हणून वापर करता येतो. मात्र यासाठी इंधन म्हणून वापरल्या जाणाऱ्या युरेनिअममधील विखंडनक्षम अणुंची संख्या वाढवावी लागते. या विखंडनक्षम युरेनिअमच्या अणुंची संख्या वाढवल्यास विखंडनाची शक्यता वाढते. त्यामुळे साध्या पाण्याच्या स्वरूपातील मंदायकाने जरी मोठ्या प्रमाणात न्यूट्रॉन कण शोषून घेतले तरी, विखंडनाची साखळी अखंडपणे सुरू राहाण्यास आवश्यक इतके न्यूट्रॉन अणुभट्टीत नेहमीच उपलब्ध असतात. ज्या युरेनिअममध्ये विखंडनक्षम अणुंची संख्या नैसर्गिक प्रमाणापेक्षा वाढवण्यात आली आहे, त्या युरेनिअमला समृद्ध युरेनिअम म्हटलं जातं. नैसर्गिक युरेनिअममध्ये विखंडनक्षम अणुंचं प्रमाण ०.७ टक्के असतं, तर समृद्ध युरेनिअममध्ये हेच प्रमाण साधारणपणे ३ ते ५ टक्क्यांपर्यंत वाढवलेलं असतं.

समृद्ध युरेनिअमची निर्मिती करण्यासाठी प्रचलित असलेल्या पद्धती या युरेनिअमच्या दोन्ही प्रकारच्या अणुमधील वजनाच्या फरकावर आधारीत आहेत. युरेनिअमचं फ्लुओरिन या मूलद्रव्याबरोबरचं संयुग कमी तापमानाला सहजपणे बाष्पिभूत होतं. असं बाष्पिभूत झालेलं संयुग छिद्रमय पटलामधून पार होऊ दिल्यास वा स्वतःभोवती फिरणाऱ्या एखाद्या भांड्यात बंदिस्त केल्यास, कमी वजनाच्या युरेनिअमच्या संयुगाचे रेणू अधिक वजनाच्या संयुगांच्या रेणूंपासून काही प्रमाणात वेगळे होतात. यामुळे अशा क्रियांचा पुनः पुनः वापर करून युरेनिअम समृद्ध करता येतं. युरेनिअमच्या समृद्धिकरणाच्या या प्रचलित पद्धतीबरोबरच लेसर तंत्रज्ञानाच्या वापराद्वारे समृद्ध युरेनिअमची निर्मिती करण्याचे प्रयत्नही चालू आहेत.

(११) युरेनिअम व्यतिरिक्त इतर कोणती इंधनं अणुभट्टीत वापरता येतात?

अणुभट्टीत वापरता येणारी युरेनिअम व्यतिरिक्त दोन इंधनं म्हणजे प्लुटोनियम आणि थोरियम ही मूलद्रव्यं. यातील प्लुटोनियम हे मूलद्रव्य निसर्गात उपलब्ध नसून ते अणुभट्टीतच तयार होतं. युरेनिअमच्या अणुकेंद्रकांच्या विखंडनादरम्यान बाहेर पडणाऱ्या न्यूट्रॉन कणांपैकी काही कण युरेनिअमच्या विखंडनक्षम नसलेल्या अणुकडून शोषले जातात. अतिरिक्त न्यूट्रॉन लाभलेले युरेनिअमचे हे अणु अस्थिर असतात. त्यांचं रूपांतर किरणोत्सर्गी क्रियांद्वारे अल्पावधीतच प्रथम नेपच्युनिअम व त्यानंतर प्लुटोनियम या किरणोत्सर्गी मूलद्रव्यांच्या अणुंत होतं. प्लुटोनियमचे हे अणु विखंडनक्षम असून ते ऊर्जानिर्मितीत सहभागी होतात. अणुइंधनाची क्षमता घटली की हे प्लुटोनियमयुक्त इंधन अणुभट्टीतून बाहेर काढलं जातं. रासायनिक प्रक्रियेद्वारे त्यातलं प्लुटोनियम युरेनिअमपासून वेगळं केलं जातं. वेगळ्या केलेल्या या

प्लुटोनिअमचं हव्या त्या प्रमाणात युरेनिअमबरोबर मिश्रण करून, ते अणुभट्टीत इंधन म्हणून वापरलं जातं.

अणुऊर्जेच्या निर्मितीसाठी वापरता येणारं थोरिअम हे मूलद्रव्य युरेनिअमप्रमाणेच निसर्गात उपलब्ध आहे. अल्पशा प्रमाणात किरणोत्सर्गी असलेल्या या थोरिअमचे अणु हे स्वतः मात्र विखंडनक्षम नाहीत. थोरिअमच्या अणुंवर न्यूट्रॉन कणांचा मारा झाल्यास त्यांचं रूपांतर अस्थिर थोरिअममध्ये होतं. या अस्थिर थोरिअमच्या अणुंचं रूपांतर किरणोत्सर्गी क्रियांद्वारे काही काळातच प्रथम प्रोटॅक्टिनिअम या मूलद्रव्याच्या व त्यानंतर युरेनिअमच्या अणुंत होतं. थोरिअमच्या अणुंपासून तयार होणारे हे युरेनिअमचे अणु विखंडनक्षम असून, ते नैसर्गिक युरेनिअममधील विखंडनक्षम अणुंपेक्षाही कमी वजनाचे असतात. थोरिअमचं रूपांतर विखंडनक्षम युरेनिअममध्ये करण्यासाठी सुरुवातीला थोरिअमचा वापर, इतर अणुइंधनाच्या बरोबरीने, अणुभट्टीतच करावा लागतो. इतर इंधनाच्या विखंडनात निर्माण होणारे न्यूट्रॉन कण या थोरिअमचं रूपांतर विखंडनक्षम युरेनिअममध्ये करतात. हे युरेनिअमसुद्धा त्यानंतर ऊर्जानिर्मितीत भाग घेऊ लागतं. कार्यक्षमता घटल्यावर हे अणुइंधन अणुभट्टीतून बाहेर काढून, त्यातील न वापरलं गेलेलं हे विखंडनक्षम युरेनिअम रासायनिक प्रक्रियेद्वारे थोरिअमपासून वेगळं केलं जातं. त्यानंतर या युरेनिअमचा वापरही थोरिअमबरोबर योग्य अशा मिश्रणाद्वारे ऊर्जानिर्मितीसाठी करता येतो.

(१२) सर्वसाधारण अणुभट्टी कशी चालते?

आजच्या अणुभट्ट्या या अणुकेंद्रकीय विखंडनावर आधारीत आहेत. या अणुभट्ट्यांच्या गाभ्यातील महत्वाचे घटक म्हणजे इंधन, मंदायक, शीतक आणि नियंत्रक कांड्या. सर्वसाधारण अणुभट्ट्यांतलं इंधन हे

ऑक्सिजनबरोबरच्या संयुगाच्या (ऑक्साईडच्या) स्वरूपात असतं. या इंधनात केंद्रकीय विखंडन होऊन ऊर्जा निर्माण होते. मंदायक हे विखंडनात निर्माण होणाऱ्या न्यूट्रॉन कणांचा वेग कमी करून त्यांना, इंधनाचं पुनः परिणामकारकरीत्या विखंडन करण्यास प्रवृत्त करते. शीतक हे विखंडनात निर्माण झालेली ऊर्जा काढून घेते. शीतकाकडील या ऊष्णतेचा वापर पाण्याची वाफ करण्यास केला जातो. (ही वाफ जनित्राचा पंखा फिरवते व यातूनच विद्युतनिर्मिती होते.) अणुभट्ट्यांतील विखंडन क्रियेवर नियंत्रण ठेवण्यासाठी बोरॉन वा कॅडमियमयुक्त कांड्यांचा वापर केला जातो. मोठ्या प्रमाणात न्यूट्रॉन शोषून घेऊ शकणाऱ्या या कांड्यांद्वारे न्यूट्रॉन कणांची संख्या आणि पर्यायाने अणुऊर्जा निर्मितीची क्रिया हटव्या त्या प्रमाणात नियंत्रित केली जाते.

बहुसंख्य अणुभट्ट्यांत साधं वा जड पाणी हे मंदायक म्हणून वापरलं जातं. पाणी हे प्रवाही असल्यामुळे, याच पाण्याचा शीतक म्हणूनही उपयोग होतो. दुहेरी कार्य करणाऱ्या या पाण्यावरचा दाब वाढवून त्याला उकळण्यापासून परावृत्त केलं जातं. त्यानंतर हेच पाणी नलिकांद्वारे दुसऱ्या पात्रातील पाण्याच्या संपर्कात आणले जाऊन, या दुसऱ्या पात्रातील पाण्याचे रूपांतर वीजनिर्मितीसाठी लागणाऱ्या वाफेत केलं जातं. मंदायक आणि शीतक म्हणून साधेच पाणी वापरणाऱ्या काही अणुभट्ट्यांमध्ये, त्यांच्या मुख्य पात्रातच या पाण्याला उकळू दिलं जातं व त्यातून निर्माण होणारी वाफ ही परस्पर वीजनिर्मितीसाठी वापरली जाते. काही मोजक्या अणुभट्ट्यांत ग्रॅफाईट हे मंदायक म्हणून वापरलं जातं. ग्रॅफाईटचं स्वरूप हे घन असल्याने, अशा अणुभट्टीत पाणी वा कार्बन-डाय-ऑक्साईड वायुसारख्या एखाद्या प्रवाही पदार्थाचा वापर शीतक म्हणून केला जातो. इथेही शीतक हे इंधनाच्या विखंडनाद्वारे निर्माण झालेली ऊर्जा आपल्या ताब्यात घेऊन, त्यानंतर दुसऱ्या पात्रातील पाण्याचं वाफेत रूपांतर करतं. ही वाफ त्यानंतर वीजनिर्मितीसाठी वापरली जाते.

### (१३) द्रुत प्रजनक अणुभट्टी म्हणजे काय?

सर्वसाधारण अणुभट्टीत युरेनिअमच्या काही अणुंचं विखंडन होत असतं, तर काही अणुंचं प्लुटोनिअममध्ये रूपांतर होत असतं. विखंडनक्षम असल्याने हे प्लुटोनिअमही ऊर्जानिर्मितीत भाग घेत असतं. नव्याने निर्माण होणाऱ्या या प्लुटोनिअमचं प्रमाण हे अणुभट्टीच्या इंधनाच्या एकूण गरजेपेक्षा खूपच कमी असतं. त्यामुळे सर्वसाधारण अणुभट्टीत सतत अणुइंधनाचा भरणा करावा लागतो. काही विशिष्ट परिस्थितीत मात्र अणुभट्टीतील विखंडनक्षम अणुंच्या निर्मितीचं प्रमाण हे विखंडन होणाऱ्या अणुंच्या प्रमाणापेक्षा वाढवता येतं. ज्या अणुभट्ट्या अशा प्रकारे खर्ची पडत असलेल्या अणुइंधनापेक्षा अधिक अणुइंधनाची निर्मिती करतात, त्या अणुभट्ट्यांना प्रजनक अणुभट्ट्या म्हणतात.

प्रजनक अणुभट्ट्यांचा एक प्रकार म्हणजे द्रुत प्रजनक अणुभट्टी. अशी अणुभट्टी साधारणतः प्लुटोनिअमच्या विखंडनावर आधारित असते. या अणुभट्टीत प्लुटोनिअममिश्रित युरेनिअम हे इंधन म्हणून वापरलं जातं. 'द्रुत' अणुभट्टीतील केंद्रकीय क्रिया या 'मंद' न्यूट्रॉन कणांद्वारे नव्हे तर, 'द्रुत' न्यूट्रॉन कणांद्वारे घडवून आणायच्या असल्याने तिथे मंदायकाचा वापर केला जात नाही. या परिस्थितीत प्लुटोनिअमची निर्मिती ही त्याच्या विखंडनाच्या तुलनेत अधिक गतिने होते. मात्र द्रुत न्यूट्रॉननी घडवलेल्या विखंडनाचं एकूण प्रमाण मुळातच कमी असल्याने, पुरेशा प्रमाणांत विखंडन होण्यासाठी या अणुभट्ट्यांच्या इंधनातील प्लुटोनिअमचं मुळचं प्रमाण हे निदान पंधरा टक्के असावं लागतं. या द्रुत प्रजनक अणुभट्ट्यांतील ऊर्जानिर्मिती ही मुख्यतः प्लुटोनियमद्वारे होते, तर युरेनिअम हे प्लुटोनियम निर्मितीचं काम करतं.

सर्वसाधारण अणुभट्ट्यांप्रमाणेच द्रुत प्रजनक अणुभट्ट्यांतील इंधनसुद्धा ऑक्सिजनच्या संयुगाच्या (ऑक्साईडच्या) स्वरूपात असतं. याखेरीज कार्बनबरोबरच्या संयुगाच्या (कार्बाईड) स्वरूपातील इंधनसुद्धा द्रुत

प्रजनक अणुभट्ट्यांत वापरलं जाऊ शकतं. अशा इंधनात अणुइंधनाचं प्रजननही अधिक जलद होतं. द्रुत प्रजनक अणुभट्टीत न्यूट्रॉनची गती कमी होऊ घायची नसल्यामुळे, या अणुभट्टीत शीतक म्हणून पाण्याऐवजी वितळलेलं सोडियम वापरलं जातं. भविष्यात युरेनिअमऐवजी थोरिअमचा वापर करणाऱ्या प्रजनक अणुभट्ट्याही अस्तित्वात येतील. या प्रगत अणुभट्ट्यांद्वारे विखंडनक्षम युरेनिअमचं सतत प्रजनन होत राहील.

(१४) किरणोत्सारी कचऱ्याची विल्हेवाट कशी लावली जाते?

अणुऊर्जानिर्मितीत वेगवेगळ्या टप्प्यांवर वेगवेगळ्या प्रकारचा किरणोत्सर्गी कचरा निर्माण होत असतो. हा कचरा द्रवरूप, घनरूप वा वायुरूप असू शकतो. त्याचं रासायनिक स्वरूप वेगवेगळं असू शकतं. तसंच त्याच्या किरणोत्सर्गाचं प्रमाणही वेगवेगळं असू शकतं. या कचऱ्याची विल्हेवाट कशी लावायची हे त्या कचऱ्याच्या या सगळ्या गुणधर्मांवरून नक्की केलं जातं. या सर्व प्रकारच्या कचऱ्यांपैकी, वापरलेल्या इंधनातून युरेनिअम व प्लुटोनिअम ही उपयुक्त मूलद्रव्यं वेगळी करण्याच्या रासायनिक प्रक्रियेत निर्माण होणारं पाणी, हा सर्वात जास्त किरणोत्सारी कचरा असतो. अणुइंधनाच्या विखंडनात निर्माण झालेल्या विविध मूलद्रव्यांची किरणोत्सारी अणुकेंद्रकं ही या पाण्यात जमा झालेली असल्याने, या जलस्वरूपी कचऱ्याला तीव्र किरणोत्सार प्राप्त होतो. सिलिका, बोरॅक्स, सोडियम नायट्रेट यासारख्या संयुगांच्या मदतीने आणि उच्च तापमानाचा वापर करून अशा कचऱ्याचं, रासायनिकदृष्ट्या स्थिर असलेल्या आणि संरचनेच्या दृष्टीने मजबूत अशा विशिष्ट प्रकारच्या काचेत रूपांतर केलं जातं. या काचेतील किरणोत्सर्गाचं प्रमाण कमी होईपर्यंत ही कचरायुक्त काच विशेष कक्षांत साठवली जाते. काही दशकांच्या साठवणीच्या कालावधीनंतर ही काच शेकडो मीटर खोल, पाण्याच्या

संपर्कात न येणाऱ्या तसंच भूगर्भीयदृष्ट्या स्थिर असणाऱ्या, अशा जमिनीखालील सुरक्षित जागी पुरली जाईल.

कमी किरणोत्सारी असणाऱ्या जलस्वरूपी कचऱ्याच्या बाबतीत, सिमेंटसारखा पदार्थ टाकून त्याचं घनरूपी पदार्थात रूपांतर केलं जातं. सिमेंटमध्ये बंदिस्त झालेला हा घनरूपी कचरा काळजीपूर्वक निवडलेल्या अशा ठिकाणच्या जमिनीखाली, काही मीटर खोलीवर, कॉक्रीटच्या विशेष जलरोधक कक्षांत गाडला जातो. मुळच्याच घनरूपी असणाऱ्या कचऱ्याची विल्हेवाटही काहीशी अशाच प्रकारे लावली जाते. वायुरूपी कचऱ्याच्या बाबतीत, हा वायु त्यातील घन स्वरूपाचे किरणोत्सर्गी कणःपदार्थ काढून टाकण्यासाठी विशेष प्रकारच्या गाळण्यांतून गाळला जातो. तसंच सक्रिय कोळशासारख्या विविध पदार्थांच्या संपर्कात आणून या वायुतील किरणोत्सर्गी आयोडिनसारखे अणु-रेणु वेगळे केले जातात. त्यानंतरच हा वायु चिमणीद्वारे नियंत्रित प्रमाणात हवेत सोडला जातो.

(१५) भारताचा अणुऊर्जा कार्यक्रम कसा आहे?

आपल्या आजच्या वीजनिर्मितीपैकी दोन-तृतियांश वीजनिर्मिती ही कोळसा आणि नैसर्गिक वायुद्वारे होते आहे. भविष्यातली विजेची वाढती गरज लक्षांत घेता, आपल्या देशांत उपलब्ध असलेला कोळसा आणि नैसर्गिक वायु काही दशकांतच संपुष्टात येणार आहे. यामुळे वीजनिर्मितीसाठी आपल्याला सौरऊर्जेसारख्या अपारंपारिक स्रोतांची मदत तर घ्यावी लागणार आहेच, पण त्याबरोबर अणुऊर्जेसारख्या मोठ्या स्तरावरील ऊर्जानिर्मितीकडेही वळावं लागणार आहे. कारण अणुइंधन हे कोळशाच्या तुलनेत सुमारे वीस लाखपट अधिक ऊर्जानिर्मिती करतं. अणुइंधन म्हणून वापरता येणाऱ्या मूलद्रव्यांपैकी युरेनिअमचे आपल्याकडील साठे मर्यादित तर आहेतच, पण ते कमी प्रतिच्या

खनिजाच्या स्वरूपातलेही आहेत. थोरिअम या अणुइंधनाच्या बाबतीत मात्र आपण श्रीमंत असून, थोरिअमच्या वैपुल्यानुसार भारताचा जगात तिसरा क्रमांक लागतो. आपल्याकडे सव्वादोन लाख टन थोरिअमचे साठे सहजपणे उपलब्ध होऊ शकतील अशा स्वरूपात आहेत. हे थोरिअम आपल्याला दीर्घकाळपर्यंत वापरता येणार असल्याने, भारताचा अणुऊर्जा कार्यक्रम हा अर्थातच थोरिअमवर केंद्रित झाला आहे.

भारताचा अणुऊर्जा कार्यक्रम हा तीन टप्प्यांचा आहे. यातला पहिला टप्पा सुरू असून या टप्प्यांतील अणुभट्ट्यांत युरेनिअम हे इंधन म्हणून वापरलं जात आहे. या अणुभट्ट्यांत निर्माण होणारं प्लुटोनिअम हे, दुसऱ्या टप्प्यातील अणुभट्ट्यांत इंधन म्हणून वापरलं जाईल. या दुसऱ्या टप्प्यातील अणुभट्ट्यांत प्लुटोनिअमच्या जोडीने थोरिअमचाही वापर करून त्यातून विखंडनक्षम युरेनिअम निर्माण करण्यात येईल. तिसऱ्या टप्प्यातील अणुभट्ट्या या नवनिर्मित युरेनिअमवर आधारीत असतील. या तिसऱ्या टप्प्यातील अणुभट्ट्या ऊर्जानिर्मितीबरोबरच स्वतःच थोरिअमपासून युरेनिअमची निर्मितीही करू लागतील. भारताच्या अणुवीजनिर्मितीच्या प्रमाणात येत्या दहा वर्षांत आजच्या तुलनेत चौपट तर त्यानंतरच्या दहा वर्षांत आजच्या तुलनेत दहा पटींहून अधिक वाढ होणं अपेक्षित आहे. या वीस वर्षांच्या काळानंतर आज एकूण वीजनिर्मितीच्या तीन टक्क्यांच्या आत असलेली अणुवीजनिर्मिती ही, तेव्हाच्या एकूण वीजनिर्मितीच्या आठ टक्क्यांपर्यंत पोचलेली असेल. इ.स. २०५० सालापर्यंत हे प्रमाण सतरा टक्क्यांपर्यंत पोचेल.

(१६) भारताचा अणुऊर्जा कार्यक्रम कसा प्रत्यक्षात आणला जात आहे?

अणुऊर्जा निर्माण करण्यासाठी वापरल्या जाणाऱ्या भारतीय अणुभट्ट्यांपैकी बहुसंख्य अणुभट्ट्यांत इंधन म्हणून नैसर्गिक युरेनिअम

वापरलं जातं. हे युरेनिअम झारखंड राज्यातल्या सिंधभूम पट्ट्यात सापडणाऱ्या खनिजांद्वारे मिळवलं जातं. जमिनीलगत तसंच जमिनीखाली खोलवर वसलेल्या या खाणींतून हे खनिज गोळा केलं जातं. झारखंडमधील जादुगोडा आणि तुरमदीह येथील प्रकल्पांत रासायनिक क्रियेद्वारे या खनिजांतील युरेनिअम वेगळं केलं जातं. मॅग्नेशियम डाययुरेनेट या संयुगाच्या स्वरूपातल्या ह्या युरेनिअमचं हैद्राबाद येथील कारख्याऱ्यात इंधन म्हणून वापरायला योग्य अशा युरेनिअम ऑक्साईडमध्ये रूपांतर केलं जातं. त्यानंतर हे इंधन झिर्कोलॉय या मिश्रधातूच्या लांब नळकांड्यात भरून अणुभट्टीत वापरलं जातं.

या अणुइंधनाचा वापर तारापूर (महाराष्ट्र), रावतभाटा (राजस्थान), कल्पक्कम (तामिळनाडू) कायगा (कर्नाटक), नरोरा (उत्तर प्रदेश) आणि काकरापार (गुजरात) येथील एकूण वीस अणुभट्ट्यांत होतो. अणुभट्टीतील काही काळाच्या वापरानंतर या अणुइंधनाची कार्यक्षमता घटते. त्यामुळे हे इंधन यानंतर अणुभट्टीतून बाहेर काढलं जातं. या वापरलेल्या अणुइंधनावर रासायनिक प्रक्रिया करून त्यातील न वापरलेलं युरेनिअम आणि निर्माण झालेलं प्लुटोनियम वेगळं केलं जातं. इंधनावरची ही 'पुनर्प्रक्रिया' तारापूर आणि कल्पक्कम येथील प्रकल्पांत केली जाते. या प्रक्रियेत वेगळं केलं गेलेलं युरेनिअम आणि प्लुटोनियम भारताच्या अणुकार्यक्रमाच्या दुसऱ्या टप्प्यांत वापरलं जाईल.

आता कार्यरत असलेल्या अणुभट्ट्यांबरोबरच रावतभाटा आणि काकरापार येथे नैसर्गिक युरेनिअमवर आधारित नव्या अणुभट्ट्यांची उभारणी केली जात आहे. तसंच हरियाना आणि मध्य प्रदेश या राज्यांत अशाच अणुभट्ट्या उभारल्या जाणार आहेत. अणुऊर्जा कार्यक्रमाच्या पहिल्या टप्प्याला अधिक गती मिळावी यासाठी कुडनकुलम (तामिळनाडू), जैतापूर (महाराष्ट्र), मिठी विर्दी (गुजरात), कोटवाडा (आंध्र प्रदेश) आणि हरिपूर (प. बंगाल) येथे आंतरराष्ट्रीय सहकार्याने, समृद्ध युरेनिअमवर

आधारित अणुभट्ट्यांच्या बांधणीची तयारी चालू आहे. याबरोबरच अणुऊर्जा कार्यक्रमाच्या दुसऱ्या टप्प्याची पूर्वतयारी म्हणून कल्पककम (तामिळनाडू) येथे द्रुत प्रजनक अणुभट्टीसुद्धा बांधली जात आहे.

(१७) अणुतंत्रज्ञानाचे वीजनिर्मितीव्यतिरीक्त इतर उपयोग कोणते?

अणुभट्टीत निर्माण होणाऱ्या किरणोत्सारी पदार्थांचे बहुविध उपयोग आहेत. यात काही वेळा किरणोत्सारी पदार्थांचा प्रत्यक्ष वापर होतो, तर काही वेळा किरणोत्सर्गी पदार्थांपासून उत्सर्जित होणाऱ्या किरणांचाच फक्त वापर केला जातो. वैद्यकीय क्षेत्रात किरणोत्साराचा वापर निदान व उपचार या दोन्हीसाठी केला जातो. अल्पजीवी किरणोत्सारी पदार्थ शरीरात पाठवून त्याचा उपकरणांच्या साहाय्याने शरीराबाहेरून वेध घेतला जातो व त्यावरून शरीरातील व्याधीचं निदान केलं जातं. कर्करोगात किरणोत्सारी पदार्थांकडून येणाऱ्या प्रारणांच्या मान्याद्वारे अनावश्यक वाढ झालेल्या पेशींचा नाश केला जातो. वैद्यकीय उपयोगाच्या वस्तुंचं निर्जंतुकीकरण करण्यासाठीही अशी प्रारणं वापरली जातात. किरणोत्सार हा सजीव पेशींत जनुकीय बदल घडवून आणतो. अशा जनुकीय बदलाद्वारे शेतीमालाचा दर्जा ऊंचावता येतो, नवी वाणं तसंच किडरोधक बियाणीही निर्माण केली जातात. किरणोत्साराच्या मान्याद्वारे फळं, कांदे-बटाटे, धान्य यासारख्या मालाचं आयुष्यही वाढवता येतं. मोठ्या स्तरावरील किडनियंत्रणासाठीही किरणोत्साराचा वापर उपयुक्त ठरला आहे.

औद्योगिक क्षेत्रातही किरणोत्साराचे अनेक उपयोग आहेत. किरणोत्सारी पदार्थांकडील प्रारणांच्या मदतीने घेतलेल्या एखाद्या वस्तुच्या छायाचित्राद्वारे, त्या वस्तुच्या ओतकामात वा जोडणीत दोष राहिला असल्यास तो कळू शकतो. पत्रे तयार करताना त्यांची जाडी योग्य आहे की नाही, हे त्या पत्र्याने शोषलेल्या प्रारणांच्या प्रमाणावरून कळू शकतं.

किरणोत्सारी पदार्थाकडून येणाऱ्या प्रारणांच्या वापराद्वारे, एखाद्या बंदिस्त टाकीतील द्रवाची पातळी किती आहे, हे बाहेरून केलेल्या निरीक्षणांद्वारे कळू शकतं. तेलासारखे द्रवपदार्थ वाहून नेणाऱ्या वाहिन्यांतील गळतीसारखे दोष, या वाहिन्यांतून अल्पजीवी किरणोत्सारी पदार्थ पाठवून व त्यांचा माग काढून, शोधून काढता येतात. किरणोत्सारी पदार्थांच्या वापराद्वारे नदीच्या पाण्यातील गाळ कोणत्या दिशेने व कसा साचतो आहे हे कळतं. आगीची सूचना देणाऱ्या काही संवेदनशील उपकरणात अत्यल्प प्रमाणात अमेरीशियमसारख्या किरणोत्सारी मूलद्रव्यांचा वापर केला जातो. अतिदूरवर पाठवल्या जाणाऱ्या अंतराळयानांतील ऊर्जापुरवठा हा विशिष्ट प्रकारच्या प्लुटोनियमच्या किरणोत्साराद्वारे केला जातो.

### (१८) अणुभट्ट्यांच्या अपघातांचं स्वरूप कसं असतं?

अणुभट्टीत अपघाताच्या वेळी होणारे स्फोट हे धोकादायक असले तरी ते अणुबाँबसारख्या तीव्रतेचे स्फोट नसतात. तसंच हे स्फोट अनेकदा अणुविखंडनामुळे नव्हे तर इतर कारणांमुळे घडून येतात. अणुभट्टीतील तापमान काही कारणाने फारच वाढलं, तर निर्माण होणाऱ्या वाफेच्या दाबाने अणुभट्टीत स्फोट होऊ शकतो. या वाढलेल्या तापमानामुळे काही वेळा वाफेची अणुइंधनाभोवती असलेल्या धातूच्या नळकांड्याबरोबर रासायनिक क्रिया होते. यात निर्माण होणाऱ्या हायड्रोजन वायुमुळे अणुभट्टीत स्फोट होतो. अशा प्रसंगी काहीवेळा खबरदारीचा उपाय म्हणून अणुभट्टीच्या आसपासचा परिसर मोकळा करण्यात येतो.

इ.स. १९७९ साली अमेरिकेतील श्री माईल आयलंड येथील झालेला अपघात हा अणुभट्टीतला मोठ्या स्वरूपाचा अपघात होता. हा अपघात शीतक म्हणून वापरायच्या पाण्याच्या वाहिन्यांतील झडपा नादुरुस्त झाल्यामुळे झाला. यानंतरच्या गुंतागुतीमुळे शीतकाचं वाफेत रूपांतर

होऊन अणुभट्टीतील शीतकच नष्ट झालं. यामुळे अणुइंधनाच्या नळकांड्या प्रमाणाबाहेर तापून वितळल्या. या प्रकारात किरणोत्सर्गी पदार्थ अणुभट्टीच्या बाहेर पडून हवेद्वारे इतरत्र पसरले. अणुभट्टीचा आणखी एक मोठा अपघात इ.स. १९८६ साली रशियातील (आताच्या युक्रेनमधील) चेर्नोबिल इथे घडला. अणुभट्टीतील नियंत्रण यंत्रणांची चाचणी चालू असतानाच तिथली ऊर्जा निर्मिती नियंत्रणाबाहेर गेली व त्यामुळे स्फोट घडून आले. मुळातच सदोष आराखड्यावर आधारलेल्या या अणुभट्टीभोवती पोलाद आणि कॉन्क्रीटचे अत्यंत आवश्यक असे विशिष्ट प्रकारचे संरक्षक आवरणही नव्हते. त्यामुळे या स्फोटात मोठ्या प्रमाणावर किरणोत्सर्ग बाहेर पडून दूरवर पसरला.

जपानमधल्या फुकुशिमा येथे अलिकडेच झालेले अणुभट्ट्यांचे अपघात हे बाह्यकारणामुळे झालेले अपघात आहेत. तिथे झालेल्या तीव्र भूकंपानंतर या अणुभट्ट्या स्वयंचलित सुरक्षा यंत्रणेद्वारे बंद पडल्या. परंतु त्यानंतर आलेल्या त्सुनामी लाटेने मात्र या अणुभट्ट्यांत शीतक म्हणून वापरल्या जाणाऱ्या पाण्याचे अभिसरण करणारे पंप बंद पाडले. परिणामी, या अणुभट्ट्यांतील अंतर्भागाचे तापमान वाढत गेले व त्याची परिणती स्फोटांत होऊन किरणोत्सर्ग बाहेर पसरू लागला.

(१९) किरणोत्साराच्या संपर्कात येणाऱ्यांची कोणती काळजी घेतली जाते?

किरणोत्सारात उत्सर्जित होणाऱ्या प्रारणांपैकी अल्फा प्रारणं ही धनभारीत कण असतात, तर बीटा प्रारणं ही ऋणभारित कण असतात. अणुइंधनातील युरेनिअम, प्लुटोनिअम किंवा थोरिअमसारख्या अणुपासूनचा किरणोत्सार हा अल्फा कणांच्या स्वरूपाचा असतो, तर विखंडनात निर्माण होणाऱ्या तुकड्यांचा किरणोत्सार हा मुख्यतः बीटा कणांच्या स्वरूपात असतो. या कणस्वरूपी उत्सर्जनाबरोबरच कणरहित असणारे गामा

किरणही उत्सर्जित होतात. अल्फा प्रारणं ही बीटा प्रारणांपेक्षा, तर बीटा प्रारणं ही गामा प्रारणांपेक्षा अधिक घातक असतात. अतिशय अस्थिर असलेल्या अणुकेंद्रकांचा किरणोत्सार हा अल्पकाळापुरता असतो, परंतु तो तीव्र स्वरूपाचा असतो. किरणोत्सारी पदार्थ हे सुरक्षित अशा बंदिस्त कक्षांत हाताळले जातात. जिथे गामा किरणांचं प्रमाण अधिक असतं, तिथे शीशाची वा काँक्रीटची पुरेशा जाडीची संरक्षक भिंत उभारून या किरणांची तीव्रता कमी केली जाते.

किरणोत्साराची मोठ्या प्रमाणात लागण झाल्यास उलट्या, भूक मंदावणे यासारखे विकार संभवतात. किरणोत्सर्गाच्या अतितीव्र मात्रेत कर्करोगासारखे विकार वा मृत्युही संभवतो. किरणोत्सर्गाचे हे शारिरीक परिणाम त्या त्या लक्षणांवरील औषधांद्वारे कमी केले जातात. किरणोत्सारी पदार्थ जर शरीरात शिरले तर त्यावरही उपाययोजना केली जाते. याचं एक उदाहरण म्हणजे किरणोत्सर्गी आयोडिन शरीरात शिरल्याची शक्यता असल्यास, त्वरित साध्या आयोडिनच्या संयुगाची मोठी मात्रा देऊन, किरणोत्सर्गी आयोडिनला थायरॉईडसारख्या ग्रंथीत साचू देण्यापासून परावृत्त केलं जातं. तसंच काही विशिष्ट प्रकारची रसायनं देऊन शरीरात शिरलेल्या किरणोत्सर्गी पदार्थांना मूत्रावाटे अधिक लवकर शरीराबाहेर जाण्यास प्रवृत्त केलं जातं.

खरं तर, आपण सगळेच वैश्विक किरणांमुळे व रेडॉनसारख्या नैसर्गिक पदार्थांमुळे निर्माण झालेल्या किरणोत्सारात वावरतो आहोत. अणुभट्ट्यांनी या किरणोत्सारात घातलेली भर एक टक्क्याहूनही कमी आहे. किरणोत्सर्गाच्या आंतरराष्ट्रीय मानकानुसार धोकादायक मानलेल्या पातळीपेक्षा अणुभट्ट्यांद्वारे निर्माण झालेल्या किरणोत्साराची सर्वसाधारण पातळी ही एक शतांशापेक्षा कमी असते. ही पातळी आणखीही कमी करण्यासाठी सतत प्रयत्न केले जात असतात.

(२०) अणुसंमीलनावर आधारित अणुभट्टी कशी असेल?

अणुविखंडनाप्रमाणे अणुसंमीलनाद्वारेही ऊर्जानिर्मिती करता येते. हे अणुसंमीलन हायड्रोजन या मूलद्रव्याच्या अणुकेंद्रकांद्वारे घडून येतं. मात्र हा हायड्रोजन वेगळ्या प्रकारचा हायड्रोजन असतो. या हायड्रोजनच्या अणुकेंद्रकांत एक किंवा दोन न्यूट्रॉन वसलेले असतात. एक न्यूट्रॉन बाळगणाऱ्या हायड्रोजनला ड्युटेरिअम आणि दोन न्यूट्रॉन बाळगणाऱ्या हायड्रोजनला ट्रिशिअम म्हटलं जातं. ड्युटेरिअमच्या दोन केंद्रकांचं (किंवा ड्युटेरिअमचं एक केंद्रक आणि ट्रिशियमचं एक केंद्रक यांचं) संमीलन घडून आल्यास त्यातून मोठ्या प्रमाणावर ऊर्जानिर्मिती होते. या दोन्ही संमीलन क्रियांत हेलियम या मूलद्रव्याच्या किरणोत्सारी नसलेल्या अशा स्थिर केंद्रकांची निर्मिती होते.

संमीलनात भाग घेणारी दोन्ही अणुकेंद्रके ही धनभारीत असतात. दोघांवर सारख्याच प्रकारचा विद्युतभार असल्याने, ही अणुकेंद्रके जेव्हा एकत्र येतात तेव्हा प्रतिकर्षणामुळे ती पुनः एकमेकांपासून दूर ढकलली जातात. त्यामुळे अणुसंमीलन घडण्याच्या दृष्टीने ती एकत्र आणण्यासाठी प्रथम या प्रतिकर्षणावर मात करण्याची गरज असते. ही गोष्ट साध्य होण्यास ही अणुकेंद्रके स्वतः प्रचंड ऊर्जाधारी असावी लागतात. साहाजिकच अशा प्रकारचं अणुसंमीलन घडण्यासाठी, अतिशय उच्च असं (दहा कोटी अंश सेल्सियसच्या आसपासचं) तापमान निर्माण करण्याची गरज असते. उच्च तापमानामुळे या संमीलनात भाग घेणारे अणु हे पुर्णपणे आयनीभूत झालेले असतात.

अणुसंमीलनावर आधारित अणुऊर्जानिर्मितीचे काही फायदे आहेत. या अणुभट्ट्याचं कार्य त्वरीत थांबवणं शक्य असल्याने संकटसमयी त्या अधिक सुरक्षित असणार आहेत. या अणुभट्ट्यांतून निर्माण होणाऱ्या किरणोत्सारी कचऱ्याचं प्रमाण अतिशय कमी असणार आहे. अशा अणुभट्टीसाठी लागणारा ड्युटेरिअम हा घटक समुद्राच्या पाण्यात मुबलक

प्रमाणात उपलब्ध आहे. मात्र अणुसंमीलनावर आधारीत अणुभट्ट्या बांधताना शास्त्रज्ञांना अनेक आव्हानांना तोंड द्यायचं आहे. यापैकी मोठं आव्हान म्हणजे, अतिशय उच्च तापमानाचा आयनिभूत वायू हा अणुसंमीलन परिणामकारकरीत्या घडून येण्याच्या दृष्टीने नियंत्रणाखाली ठेवणं! अशा आव्हानांमुळे अणुसंमीलनाद्वारे ऊर्जानिर्मिती करणाऱ्या, व्यावहारिक स्वरूपाच्या अणुभट्टीची उभारणी पूर्ण होण्यास अजून काही काळ थांबावं लागेल.

(२१) निसर्ग हा कशा प्रकारे अणुतंत्रज्ञान राबवतो?

अणुतंत्रज्ञान हे निसर्गाला नवं नाही. निसर्ग हा ऊर्जानिर्मितीसाठी अणुसंमीलनाच्या तंत्राचा वापर अब्जावधी वर्षांपूर्वीपासून करतो आहे. आकाशात दिसणारे तारे म्हणजे प्रत्यक्षात प्रचंड आकाराच्या अणुभट्ट्याच आहेत. आपल्याला ऊर्जा पुरवणारा सूर्य हीसुद्धा यापैकीच एक अणुभट्टी असून त्यात सतत हायड्रोजनच्या अणुंचं संमीलन होऊन त्यांचं हेलियमच्या अणुंत रूपांतर होत आहे. अशा अणुभट्टीत ऊर्जेबरोबरच किरणोत्साराचीही निर्मिती होत असते. आपल्या पृथ्वीवर आढळणाऱ्या नैसर्गिक किरणोत्सारात सूर्यावर निर्माण होणाऱ्या या किरणोत्साराचाही वाटा असतो.

अणुविखंडनावर आधारलेल्या नैसर्गिक अणुभट्ट्या तर खुद्द पृथ्वीवरच आढळल्या आहेत. पश्चिम आफ्रिकेतल्या गॅबन या देशातील ओक्लो परिसरातील युरेनिअमच्या खाणीत अशा अणुभट्ट्यांचे अवशेष सापडले आहेत. या अणुभट्ट्यांतील विखंडन क्रिया सुमारे पावणेदोन अब्ज वर्षांपूर्वी नैसर्गिकरीत्या घडून आल्या. संशोधनात्मक कार्यासाठी आज वापरल्या जाणाऱ्या छोट्या अणुभट्टीत जितकी ऊर्जानिर्मिती होते, तितकी ऊर्जानिर्मिती या अणुभट्ट्यांतून होत होती. अणुभट्ट्यांची ही ठिकाणं म्हणजे प्रत्यक्षात तीस मीटरहून अधिक खोलीवरील युरेनिअमयुक्त

खनिजांच्या साठ्यातील काही विशिष्ट जागा आहेत. युरेनिअमच्या या साठ्यांमध्ये सापडलेल्या स्ट्रॉंशिअम, सिशिअम, झिर्कोनिअम यासारख्या, अणुविखंडनात निर्माण होणाऱ्या, अनेक मूलद्रव्यांमुळे या अणुभट्ट्यांचा शोध लागण्यास मदत झाली. या अणुऊर्जानिर्मितीत सहभागी झालेल्या एकूण आठशे टन नैसर्गिक युरेनिअमपैकी सहा टन युरेनिअमचं विखंडन झालं असावं.

या अणुभट्ट्यांच्या कार्यकाळात तिथल्या युरेनिअममधील विखंडनक्षम अणुचं प्रमाण हे तीन टक्क्यांहून अधिक होतं. त्यामुळे इथली परिस्थिती ही समृद्ध युरेनिअम वापरून चालवल्या जाणाऱ्या आजच्या अणुभट्ट्यांसारखी होती. या खाणीतच असलेल्या साध्या पाण्याच्या मदतीने अणुविखंडनाची साखळी सुरू झाली व ती सुमारे दीड लाख वर्षे चालू राहिली. युरेनिअममधील विखंडनक्षम अणु हे युरेनिअमच्या इतर अणुपेक्षा तुलनात्मकदृष्ट्या अधिक किरणोत्सारी असल्याने, त्यांचं रूपांतर इतर मूलद्रव्यांच्या अणुंत अधिक लवकर झालं. त्यामुळे कालांतराने युरेनिअमच्या या साठ्यांमधील विखंडनक्षम युरेनिअमच्या प्रमाणात घट झाली आणि नैसर्गिक विखंडनाच्या साखळीला विराम मिळाला.

-----

# Nuclear Power Plants in India

